

SELLULOOSAKAKKUJEN SUODATUSVASTUSTEN  
JA PESUMEKANISMIN TUTKIMISESTA

Diplomityö, jonka  
VESA HEIKKI AULANKO  
on jättänyt tarkastettavaksi  
TEKNILLISEN KORKEAKOULUN  
kemian osastossa  
diplomi-insinööritutkintoa  
varten

Otaniemessä syyskuun 5. päivänä 1971

Tekijän nimikirjoitus: *Vesa Aulanko*

Työtä johtaneen pro-

fessorin nimikirjoitus: *Harry V. Merila*  
*Pauli Törninen*



Diplomityön kokeellinen osa on suoritettu Teknillisen korkeakoulun kemian laitetekniikan laboratoriossa 13.4. - 5.8. 1971 välisenä aikana.

Työtä ohjasi DI Reijo Seppänen. Häntä sekä TL Martti Järveläistä ja DI Johan Gullichsenia kiitän saamastani ohjauksesta. Työn kokeellista osaa valvonutta DI Pauli Tiaista kiitän saamastani avusta ja ohjeista. Lisäksi esitän kiitokseni Kymi Osakeyhtiölle ja Teknillisen korkeakoulun kemian laitetekniikan laboratorion henkilökunnalle saamastani avusta.

/in



## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
KIRJALLISUUSOSA	
I YLEISTÄ SUSPENSIOISTA	2
A. Suspensioiden verkkorakenteesta	2
B. Aktiiviset ja passiiviset kuidut	3
C. Konsentraatorajat vuorovaikutukselle ja verkkorakenteen muodostumiselle	4
II KUITUVERKOSTON MEKAANISISTA OMINAISUUKSISTA	7
A. Yleistä	7
B. Staattisen kuorman vaikutukset	8
1. Ensimmäiset tutkimukset	8
2. Kokoonpuristuvuusyhtälöt	11
2.a Yksinkertaisin eksponenttimuoto	11
2.b Muita kokoonpuristuvuusyhtälöitä	16
3. Ryömintä	19
4. Mekaaninen vakioituminen	21
5. Kokoonpuristuksen mekanismi	22
6. Palautumattomat muutokset	24
7. Nopeat muutokset	27
C. Kokoonpuristuminen virtauskitkan vaikutuksesta	28
D. Selluloosakakkujen viskoelastisuus	30



1. Tiheiden kakkujen viskoelastisuus	30
1.a Yleistä	30
1.b Viskoelastisuuden ja kokoonpuris- tuvuuden analogia tiheillä kakuilla	32
2. Laimeitten kakkujen viskoelastisuus	36
2.a Yleistä	36
2.b Viskoelastisuuden ja kokoonpuris- tuvuuden analogia laimeilla kakuilla	37
E. Väliaineen vaikutus	38

## KOKEELLINEN OSA

I TYÖN TARKOITUS	40
A. Geometrinen malli	41
B. Kirjallisuuden tutkimukset painehäviöstä	41
II KÄYTETTY LAITTEISTO	45
A. Yleistä	45
B. Laitteiston osat	45
1. Nesteen syöttö	45
2. Virtauksen säätö	48
3. Pesukolonni	48
4. Pesuliuoksen poisto	50
5. Paineen mittaus	51
6. Konsentraatiomittaukset	53
7. Lämpötilamittaukset	53
III MITTAUSTEN SUORITTAMINEN	55



A. Yleistä	55
1. Käytetty selluloosa	55
2. Tutkitun kakun valmistaminen	55
B. Pesukokeiden suorittaminen	56
1. Kakun vakioiminen	56
2. Kakun kyllästäminen	58
3. Varsinainen pesu	59
4. Pesuvakioitten määrittäminen	59
4.a Virtauskanavien määrittäminen	59
4.b Poikittaiskanavien määrittäminen	60
5. Eri pesukokeet	60
5.a Virtausnopeuden vaikutuksen tutkiminen	61
5.b Kakun korkeuden vaikutuksen tutkiminen	61
C. Painehäviökokeitten suorittaminen	61
1. Kokonaispainehäviön määrittäminen	61
2. Painehäviön jakautuman mittaaminen	62
3. Konsistenssin määrittäminen	63
IV TULOKSET	64
A. Pesukokeiden tulokset	64
1. Tulosten esitystapa	64
2. Tulosten tarkastelu	64
2.a Virtausnopeuden vaikutus	65
2.b Kakun korkeuden vaikutus	68
2.c Kokonaispainehäviön vaikutus	68



2.d Dimensiottoman ajan ja tilavuus-	73
suhteen välinen riippuvuus	
3. Johtopäätökset pesukokeiden tuloksista	75
4. Virhelähteet pesukokeissa	76
5. Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin	77
B. Painehäviökokeiden tulokset	77
1. Painehäviön laskeminen	77
2. Kokonaispainehäviön mittausten	79
tulokset	
3. Painehäviön jakautuman mittausten	82
tulokset	
4. Johtopäätökset tuloksista	82
5. Virhelähteet painehäviökokeissa	86
C. Ehdotuksia tutkimusten jatkamiseksi	87
V YHTEENVETO	89
KIRJALLISUUSLUETTELO	91
LIITTEET	



## KÄYTETYT MERKINNÄT

- $A$  = pinta-ala = ( )  $m^2$   
 $a$  = kakun paksuus laajenemisen jälkeen,  
 yhtälö (5) = ( ) m  
 $b$  = kakun paksuus, kun puristava massa on  
 $84,4 \text{ t/m}^2$  = ( ) m  
 $c$  = kakun konsistenssi, tiheys = ( )  $kg/m^3$   
 $c^0$  = kakun keskimääräinen konsistenssi = ( )  $kg/m^3$   
 $c_0$  = kakun konsistenssi, kun kuormitus on nolla  
 = ( )  $kg/m^3$   
 $c'$  = kuitujen tilavuuskonsentraatio = ( )  
 $c_r$  = kuitujen tilavuuskonsentraatioraja vuoro-  
 vaikutukselle = ( )  
 $c_v$  = kuitujen sedimentaatiotilavuuskonsentraatio  
 = ( )  
 $c_{vmin}$  = pienin mahdollinen kuitujen tilavuuskonsen-  
 traatio, jossa esiintyy verkkorakenne,  
 yhtälö (4) = ( )  
 $d$  = kuidun halkaisija = ( ) m  
 $E$  = kimmomoduli = ( )  $N/m^2$   
 $F$  = kitkatekijä, yhtälö (22)  
 $f$  = dynaamisen rasituksen taajuus = ( ) 1/s  
 $G$  = leikkausmoduuli = ( )  $N/m^2$   
 $G_0$  = vakio yhtälössä (25) = ( )  
 $G(j\omega)$  = kompleksinen leikkausmoduuli = ( )  $N/m^2$



- $G(j\omega)_0$  = kompleksinen leikkausmoduuli referenssitilä-  
 heydessä = ( )  $\text{N/m}^2$
- $G'(\omega)$  = kompleksisen leikkausmoduulin reaali-osa  
 = ( )  $\text{N/m}^2$
- $G''(\omega)$  = kompleksisen leikkausmoduulin imaginääri-  
 osa = ( )  $\text{N/m}^2$
- $H$  = kakun kokonaiskorkeus = ( ) m
- $h$  = etäisyys kakun pinnasta = ( ) m
- $h_{\text{suht}}$  = suhteellinen korkeus =  $h/H$  = ( )
- $j$  = kompleksitekijä
- $K$  = kakusta poistuvan liuoksen konsentraatio  
 hetkellä  $t$  = ( )  $\text{mol/l}$
- $K_0$  = kakussa olevan liuoksen konsentraatio  
 hetkellä  $t = 0$  = ( )  $\text{mol/l}$
- $K_w$  = tulevan pesuliuoksen konsentraatio  
 = ( )  $\text{mol/l}$
- $K_n$  = vakio yhtälöissä (8) ja (9) = ( )
- $k$  = suhteellinen konsentraatio =  $K/K_0$  = ( )
- $l$  = kuidun pituus = ( ) m
- $l/d$  = kuidun pituus/halkaisija-suhde = ( )
- $M$  = kokoonpuristuvuuskerroin = ( )
- $M_i$  = kertoimet yhtälöissä (19), (20) ja (21) = ( )
- $M_1$  = mekaanisesti vakioituneen tilan kokoonpu-  
 ristuvuuskerroin = ( )
- $M_0$  = vakio yhtälössä (9) = ( )
- $M'$  = vakio yhtälössä (10) = ( )



- $m$  = kuitujen paino-osuus = ( )  
 $m_s$  = kuitujen sedimentaatiopaino-osuus = ( )  
 $N$  = kokoonpuristuvuuseksponentti = ( )  
 $N_i$  = eksponentit yhtälöissä (19), (20) ja (21) = ( )  
 $N_l$  = mekaanisesti vakioituneen tilan kokoonpuristuvuuseksponentti = ( )  
 $N'$  = eksponentti yhtälöissä (25) ja (26) = ( )  
 $n$  = kuitujen välisten kosketuskohtien lukumäärä  
 $P$  = staattinen kuormitus = ( )  $N/m^2$   
 $P_o$  = staattinen kuormitus referenssitiheydessä = ( )  $N/m^2$   
 $\Delta P$  = kokonaispainehäviö = ( )  $N/m^2$   
 $\Delta p$  = painehäviö etäisyydellä  $h$  kakun pinnasta = ( )  $N/m^2$   
 $\Delta p_{suht}$  = suhteellinen painehäviö =  $\Delta p / \Delta P$  = ( )  
 $q$  = vakio yhtälössä (27) = ( )  
 $R$  = palautumisaste, yhtälö (5) = ( )  
 $R_o$  = kompleksinen leikkausmoduuli tai staattinen kuormitus referenssitiheydessä = ( )  $N/m^2$   
 $R(t)$  = funktio, joka kuvaa yksittäisen kuidun viskoelastisia ominaisuuksia = ( )  
 $r$  = dynaaminen rasitus = ( )  $N/m^2$   
 $r_o$  = dynaamisen rasituksen amplitudi = ( )  $N/m^2$   
 $S_v$  = ominaispinta-ala = ( )  $m^2/m^3$   
 $s$  = Kozenyn kerroin, yhtälö (26) = ( )  
 $T$  = vakio, yhtälö (11) = ( )  
 $t$  = aika = ( ) s



- $U$  = vakio, yhtälö (11) = ( )  
 $u$  = pesunesteen lineaarinopeus = ( ) m/s  
 $V_1$  = virtauskanavien tilavuus = ( ) m<sup>3</sup>  
 $V_2$  = poikittaiskanavien tilavuus = ( ) m<sup>3</sup>  
 $\dot{V}$  = virtausmäärä = ( ) m<sup>3</sup>/s  
 $v$  = ominaistilavuus = ( ) m<sup>3</sup>/kg  
 $w$  = vakio yhtälössä (27) = ( )
- $\alpha$  = vakio yhtälössä (10) = ( )  
 $\beta$  = vakio yhtälössä (10) = ( )  
 $\gamma_0$  = vakio yhtälössä (9) = ( )  
 $\epsilon$  = virtauskanavien tilavuuden suhde poikittaiskanavien tilavuuteen =  $V_1/V_2$  = ( )  
 $\epsilon'$  = kakun huokoisuus = ( )  
 $\eta$  = viskositeetti = ( ) Ns/m<sup>2</sup>  
 $\Theta$  = dimensioton aika =  $\frac{\epsilon+1}{\epsilon} \frac{\dot{V}}{V_1+V_2}$  = ( )  
 $\nu, \nu_0$  = kiinteän aineen osuus kakussa = ( )  
 $\rho_f$  = kuidun tiheys = ( ) kg/m<sup>3</sup>  
 $\varphi_0$  = orientoitumiskulma, kun kiinteän aineen osuus kakussa on  $\nu_0$  = ( )  
 $\varphi$  = orientoitumiskulma, kun kiinteän aineen osuus kakussa on  $\nu$  = ( )  
 $\tan(\tau)$  = häviötangentti = ( )  
 $\omega$  = dynaamisen rasituksen kulmanopeus = ( ) 1/s  
 $\lambda$  = pesukäyrän jyrkkyys  $\Theta$ -k koordinaatistossa = ( )



## TIIVISTELMÄ

Työssä on tutkittu kokeellisesti sulfaattiselluloosakakkujen pesua ja painehäviötä veden virratessa pak-suhkojen selluloosakakkujen läpi.

Pesun tutkimisessa määritettiin poistuvan liuoksen konsentraatio ajan funktiona, kun hetkellä  $t = 0$  muut-tui pesuliuoksen konsentraatio kakun yläpinnalla por-rasfunktion mukaisesti. Tässä vaiheessa tutkittiin virtausnopeuden, kakun korkeuden ja kokonaispainehä-viön vaikutusta pesun edistymiseen.

Painehäviökokeissa tutkittiin virtausnopeuden ja ka-kun korkeuden vaikutusta painehäviöön ja painehäviön jakautumaan. Saatuja mittaustuloksia on vertailtu teoreettisiin laskelmiin.

Tulokset eri kokeista on molemmissa tutkimuksissa esi-tetty sekä taulukkoina että kuvina.

Kirjallisuusosassa on käsitelty etupäässä kokeellisia tutkimuksia staattisen ja dynaamisen rasituksen vai-kutuksista kuitujen, lähinnä selluloosan, muodosta-miin suspensioihin. Samoin on käsitelty rasitusten ai-heuttamien muutosten mekanismeja.



## KIRJALLISUUSOSA

### I YLEISTÄ SUSPENSIOISTA

#### A. Suspensioiden verkkorakenteesta

On pitkään tiedetty, että selluloosasuspensioiden virtausominaisuudet eroavat huomattavasti itsenäisten partikkelien muodostamien suspensioiden virtausominaisuuksista. Forgacs et al. /1/ osoittivat 1958, että kuidut selluloosasuspensioissa muodostavat yhtenäisen verkkorakenteen, jonka vetolujuus voidaan mitata. Tällaisen selluloosasuspension on osoitettu käyttäytyvän lähinnä ei-Newtonisen nesteen tavoin. On todettu /2/, että märän paperirainan verkkorakenteen aiheuttavat lähinnä kolmefaasisysteemin kuitu/neste/ilma faasien väliset pintajännitykset. Kaksi-faasisysteemin kuitu/neste verkkorakenteen yhtenäisyyden ei voida selittää johtuvan pelkästään kemiallisista sidoksista ja pintajännityksestä, vaan verkkorakenne aiheutuu lähinnä jännitystilojen aikaansaamista voimista kuiduissa ja kosketuskohdissa olevista kitkavoimista. Kemialliset vetovoimat vaikuttavat vain niihin kuituihin, joilla ei ole tarpeeksi kosketuskohtia muihin kuituihin, jotta ne voisivat aktii-



visesti ottaa osaa verkkorakenteen muodostamiseen. Täten kemiallisilla vetovoimilla on vain hyvin pieni vaikutus systeemiin.

## B. Aktiiviset ja passiiviset kuidut

Steenberg et al. /3/ määrittelevät kuidun aktiiviseksi, kun sillä on vähintään kolme kosketuskohtaa muihin kuituihin. Koska kemialliset voimat on todettu pieniksi, täytyy verkkorakenteessa olla näitä aktiivisia kuituja, jotta systeemin läpi voisi välittyä voimia. Kuidut, joilla ei ole näitä kolmea kosketuskohtaa, ovat passiivisia kuituja.

Se, että tarvitaan kolme kosketuskohtaa voimien välittämiseen voidaan havainnollistaa ajattelemalla kuitua palkiksi. Mikäli kosketuskohtia on kolme, kaksi alapuolella ja yksi yläpuolella, voi ylhäältäpäin tuleva rasitus välittyä ko. kuidun kautta alempana oleviin kuituihin edellä mainittujen kahden kosketuskohdan välityksellä. Jos kuidulla on vain kaksi kosketuskohtaa muihin kuituihin, yksi alapuolella ja yksi yläpuolella, aiheuttaa ylhäältäpäin tuleva rasitus vain kuidun kääntymistä tai taipumista. Mikäli kääntyminen tai taipuminen on niin suuri, että kuitu saa uuden kosketuskohdan, muuttuu ko. kuitu aktiiviseksi kuiduksi.



C. Konsentraatiorajat vuorovaikutukselle ja verkko-  
rakenteen muodostumiselle

Mason /4/ on osoittanut, että on olemassa konsentraa-  
tioraja

$$(1) \quad c_r = \frac{6}{(l/d)^2}$$

$l/d$  = kuidun pituus/halkaisija-suhde

jota suuremmissa konsentraatioissa kuidut eivät voi  
liikkua toisiinsa kuituihin nähden häiriöttömästi.

Meyer ja Wahren /5/ ovat johtaneet samanpaksuisille  
ja -pituisille kuiduille yhtälön sedimentaatiotila-  
vuuskonsentraation määrittämiseksi

$$(2) \quad c_v = \frac{8\pi(l/d)}{\left[ \frac{l/d}{n} + \frac{n}{n-1} \right]^3 (n-1)}$$

$n$  = kosketuskohtien lukumäärä

Mikäli  $n = 3$  saadaan pienin mahdollinen tilavuuskon-  
sentraatio, jossa jatkuva verkkorakenne voi esiintyä

$$(3) \quad c_{vmin} = \frac{4\pi(l/d)}{\left[ \frac{(l/d)}{3} + \frac{3}{2} \right]^3}$$



Mikäli  $l/d$  on suuri, saadaan

$$(4) \quad c_{vmin} = \frac{108 \pi}{(l/d)^2}$$

Näin ollen konsentraatioissa  $c_r \leq c' < c_{vmin}$  kuitujen välillä esiintyy vuorovaikutusta ja kun  $c' \geq c_{vmin}$  muodostavat kuidut jatkuvan verkkorakenteen.

Thalen ja Wahren /6/ osoittivat kokeellisesti, että  $n$  saa arvoja 3...5 riippuen kuitujen pituudesta. Se että todelliset mitatut konsentraatioarvot olivat suurempia kuin kaavan (3) perusteella lasketut konsentraatioarvot, kun  $n = 3$ , osoittaa, etteivät kaikki kuidut ota aktiivisesti osaa verkkorakenteen muodostamiseen. Vaikka kaavan johdossa oletettiin, että kuidut ovat yhtäpitkiä, saatiin myös eripituisten kuitujen muodostamilla verkkorakenteilla hyvä korrelaatio sekä kaavan (3) että vakiopituisilla kuituilla tehtyjen kokeiden kanssa, kun kaavaan (3) sijoitettaessa käytettiin pituutena kuitujen painokeskimääräistä pituutta. Käytettäessä kuitujen lukukeskimääräistä pituutta ei havaittu korrelaatiota.

Tutkiessaan lasikuituja mikroskoopin avulla puristuksen vaikuttaessa verkkorakenteeseen, havaitsi Elias /7/, että kosketuskohtien keskimääräinen lukumäärä



kuitua kohden vaihteli 6,5 ... 21,6 riippuen kuidun pituudesta, halkaisijasta ja kiinteän aineen osuudesta kakussa. Han /8/ on esittänyt Eliasin tutkimuksiin perustuen, että kiinteän aineen osuuden ja kuidun pituusyksikköä kohden havaitun kosketuskohtien lukumäärän välillä olisi lineaarinen korrelaatio. Koska kokeellisia tuloksia oli hyvin vähän, ei johtopäätös ole kovinkaan varma.



## II KUITUVERKOSTON MEKAANISISTA OMINAISUUKSISTA

### A. Yleistä

Kun viskoelastiseen materiaaliin kohdistetaan rasitus, havaitaan muutos, joka on riippuvainen materiaalin molekulaarisesta rakenteesta tai siitä tavasta, jolla pienet yksiköt, esim. kuidut, muodostavat kokonaisuuden.

Muutoksella tarkoitetaan koko tutkittavan materiaalin reagointia, esim. tilavuuden muutosta, kohdistettuun rasitukseen. Muodonmuutoksella tarkoitetaan tutkittavan materiaalin yksikössä, esim. kuidussa, tapahtumatta rasituksen aiheuttamaa reagointia.

Jos kuormitus vaikuttaa tietyn ajan, voidaan muutos jakaa kahteen osaan: välitön elastinen muutos ja ajasta riippuvainen muutos. Jos rasitus poistetaan, palautuu ensiksimainittu, ellei materiaalissa tai verkkorakenteessa ole tapahtunut hajoamista. Ajasta riippuvainen osa muutoksesta palautuu vähitellen lähestyen tiettyä raja-arvoa. Jos tutkittavaa rakennetta ei ole kuormitettu aikaisemmin, havaitaan, että palautuvuus ei ole yhtä suuri kuin rasituksen aiheuttama muutos, eli on olemassa tietty palautumaton muu-



tos.

Jos samaan rakenteeseen kohdistetaan useita rasituspalautuskokeita, havaitaan palautumattoman muutoksen pienenevän koko ajan, kunnes muutoksen voidaan katsoa olevan täysin palautuva. Tällöin sanotaan verkkorakenteen olevan mekaanisesti vakioituneen.

Seuraavassa tarkastellaan suoritettuja tutkimuksia kuormituksen vaikutuksesta kuitujen muodostamaan verkkorakenteeseen. Huomiota on kiinnitetty etupäässä selluloosalla saatuihin tuloksiin, mikäli niitä on asiasta löytynyt.

## B. Staattisen kuorman vaikutukset

### 1. Ensimmäiset tutkimukset

Ensimmäiset tutkimukset selluloosakakkujen kokoonpuristuvuudesta ja palautuvuudesta, kun kakkuun vaikutti männän avulla saatu kuormitus, suorittivat Seborg et al. /9,10,11/. Palautuvuudelle he määrittivät palautumisasteen seuraavasti:

$$(5) \quad R = \frac{a - b}{b} 100$$

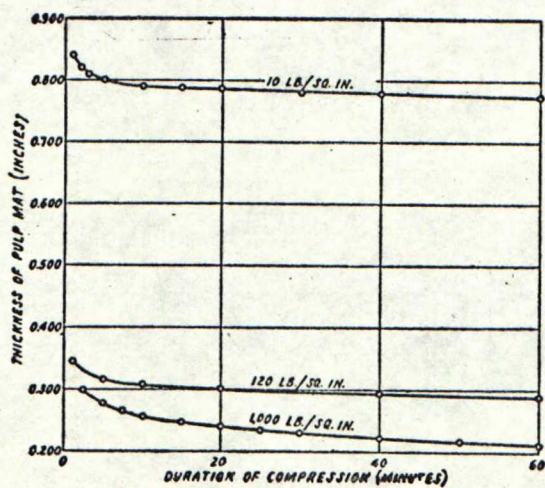


R = palautumisaste

a = kakun paksuus laajenemisen jälkeen

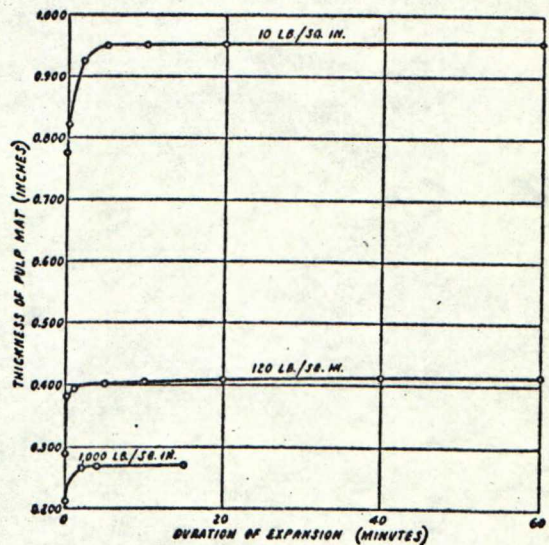
b = kakun paksuus, kun puristava massa on  $84,4 \text{ t/m}^2$  ( $120 \text{ lb/in}^2$ )

Oheisista kuvista [1,2,3,4,5,6] selviää osa heidän saamistaan tuloksista



Kuva 1.

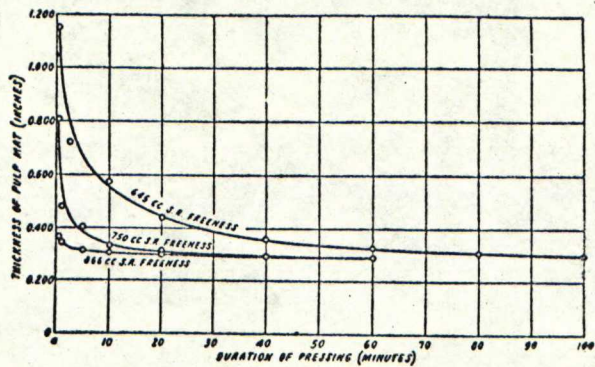
Rasituksen suuruuden vaikutus muutokseen



Kuva 2.

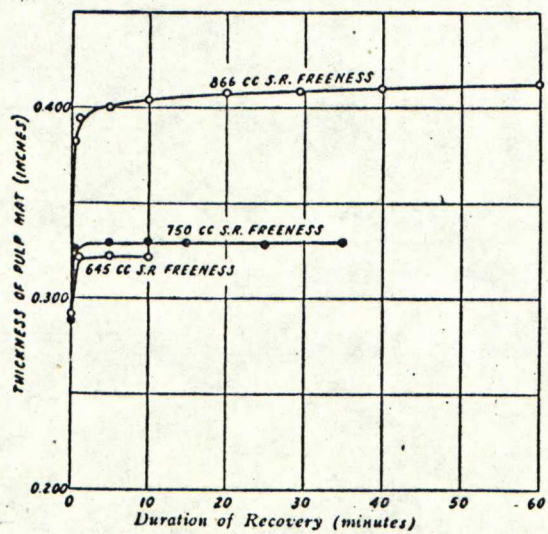
Rasituksen suuruuden vaikutus palautumiseen





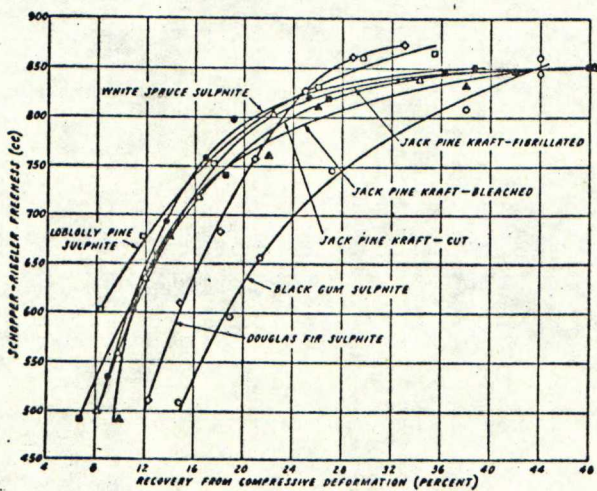
Kuva 3.

Jauhatusasteen vaikutus muutokseen



Kuva 4.

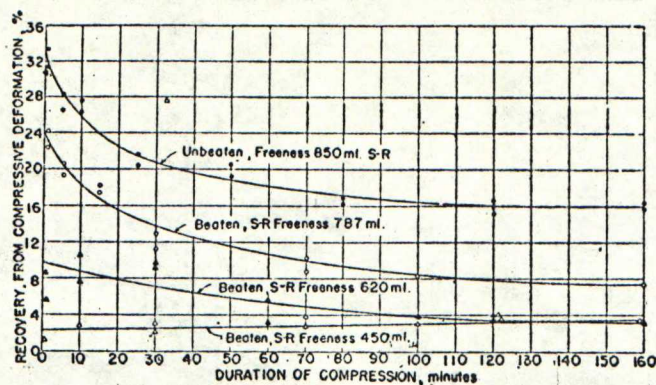
Jauhatusasteen vaikutus palautumiseen



Kuva 5.

Palautumisasteen riippuvuus jauhatusasteesta





Kuva 6.

Rasituksen vaikutusajan vaikutus  
palautumisasteeseen eri jauhatus-  
asteilla

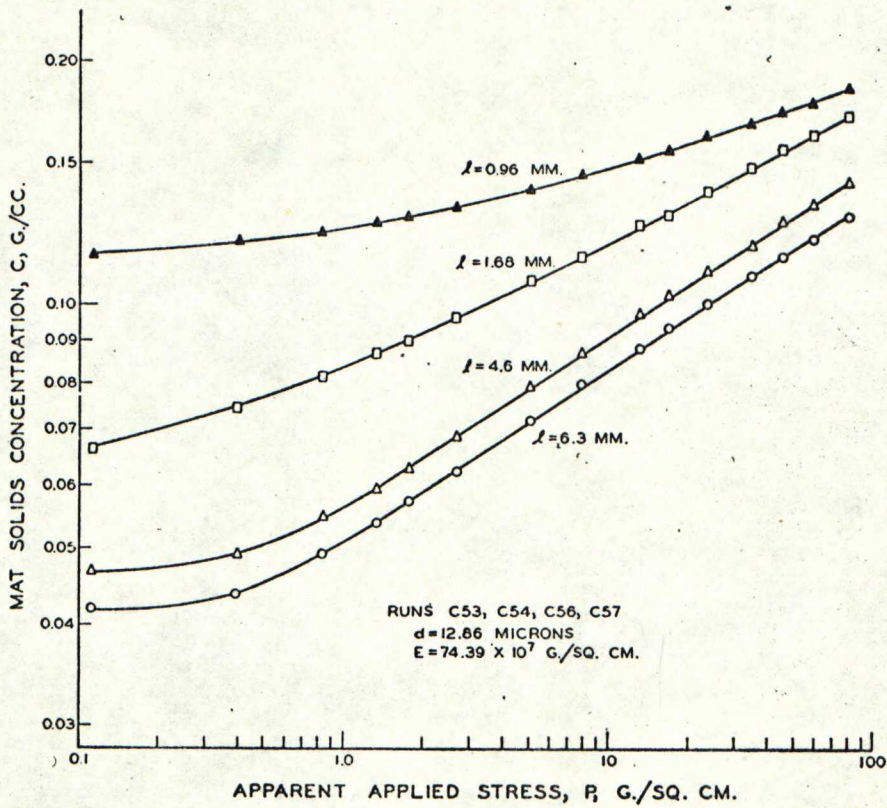
Edellä esitetyistä kuvista havaitaan, että palautu-  
misaste on riippuvainen sekä rasituksen kestoajasta  
että yksittäisen kuidun taipuisuudesta. Kokeissa käy-  
tetyissä kakuissa oli yleensä 6 grammaa uunikuivaa  
selluloosaa, mikä vastaa konsistenssia  $50 - 80 \text{ kg/m}^3$

## 2. Kokoonpuristuvuusyhtälöt

### 2.a Yksinkertaisin eksponenttimuoto

Mikäli piirretään kokoonpuristuvuuskokeitten tulokset  
koordinaatistoon  $\log(\text{konsistenssi}) = f(\log(\text{kuormitus}))$ ,  
kuten kuvassa [7] on tehty, havaitaan, että tietyn suu-  
ruisen kuormituksen jälkeen tulee kuvaajasta suora.





Kuva 7. Kokoonpuristuvuustulokset mekaanisesti vakioituneelle lasikuitukakulle /15/

Qviller /12/ esitti ensimmäisenä yhtälön, jolla lineaarista osaa voidaan kuvata

$$(6) \quad \frac{c}{\text{kg/m}^3} = M \left( \frac{P}{\text{N/m}^2} \right)^N$$

c = konsistenssi

P = kuormitus

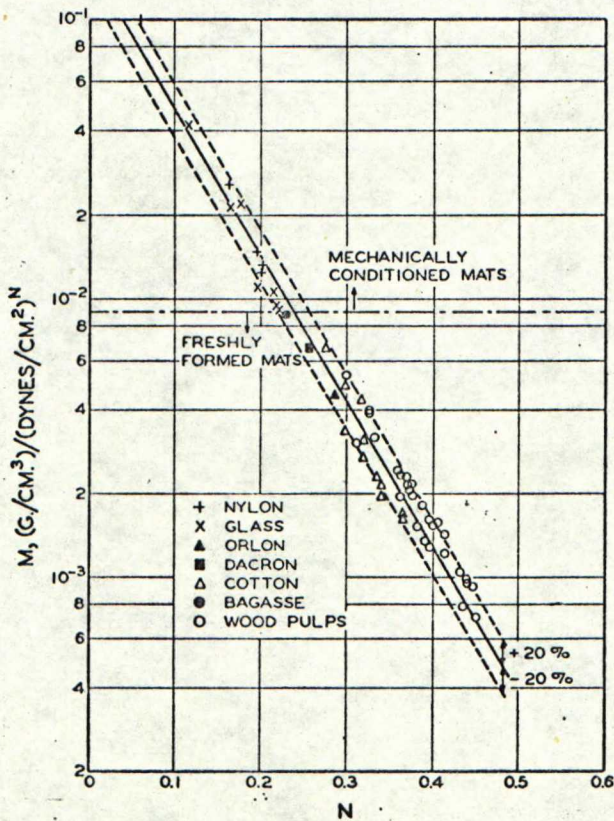
M = vakio

N = vakio



Tämän yhtälön osoittivat myöhemmin Campbell /13/ ja Ingmanson /14/ oikeaksi.

Han /8/ on suorittanut yhteenvedon tehdyistä kokoonpuristuvuuskokeista kuormituksen ollessa alle  $10^4 \text{ N/m}^2$  ( $100 \text{ g/cm}^2$ ). Hän esittää kuvan [8] osoittaman korrelaation M:n ja N:n välillä



Kuva 8.

Korrelaatio va-  
kioitten M ja  
N välillä

Kuvasta havaitaan, että kaikki suoritettut kokeet osuvat  $\pm 20\%$  rajojen sisälle. Näinkin suuri hajonta voi johtua siitä, että tutkimuksissa on käytetty erilai-



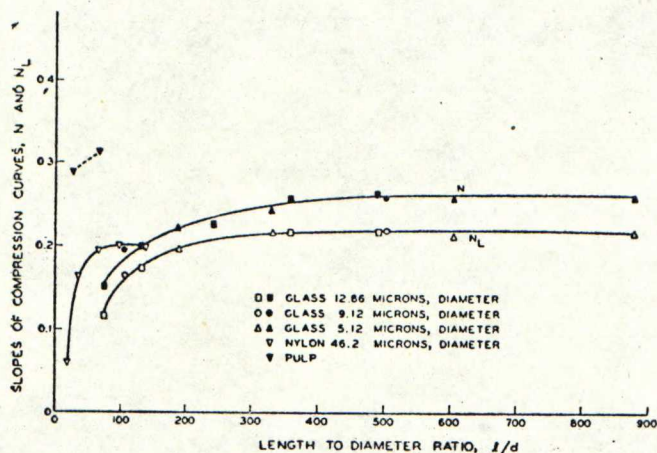
sia laitteita ja että esim. selluloosan kohdalla tuloksiin sisältyy sekä laboratorioissa valmistetuille erikoislaaduille että kaupallisille laaduille suoritettuja kokeita.

Yhtälöllä (6) voidaan kuvata kakun käyttäytymistä perättäisissä rasitus-palautuskokeissa. Tällöin saadaan kullekin puristukselle ja palautukselle omat vakioitten  $M$  ja  $N$  arvot, kunnes kakku saavuttaa mekaanisesti vakioituneen tilan, jolle saadaan omat vakiot  $M_1$  ja  $N_1$ . Jones /15/ on osoittanut, että yhtälöä (6) ei voida käyttää kuvaamaan mekaanisesti vakioituneessa tilassa olevassa kakussa tapahtuvia muutoksia, mikäli kuormitus on pieni. Hän havaitsi, että suurilla kuormituksen arvoilla mekaanisesti vakioituneet lasikuitukakut käyttäytyvät yhtälön (6) osoittamalla tavalla, mutta tutkittaessa selluloosan ja nylonkuitujen muostamia kakkuja erosivat kokeelliset tulokset yhtälön antamista tuloksista jonkin verran.

Jones /15/ on esittänyt kuvan [9] osoittaman  $N$ :n ja  $N_1$ :n riippuvuuden kuitujen pituus/halkaisija-suhteesta  $l/d$  erilaisille kuiduille. Sitä  $l/d$  arvoa, jota suuremmat arvot eivät enää vaikuta eksponentin arvoon kutsuu Jones kriittiseksi pituus/halkaisija-suhteeksi. Kuvasta [9] huomataan, että lasikuidulla tämä arvo on 500 - 600 ja nylonilla 75 - 100. Samoin hän on



todennut, että M saavuttaa tietyn arvon jonka jälkeen  $l/d$  suhteen kasvamisella näyttää olevan vain vähän vaikutusta M:n arvoon.



Kuva 9.

$l/d$ :n vaikutus  
N:n ja  $N_L$ :n ar-  
voihin erilaisil-  
la kuiduilla

Han /8/ on esittänyt, että N:n arvo on vähän alle  $1/3$ , mikäli kuidussa esiintyy puristuksen aikana pelkästään taipumista. Viskoelastisilla kuiduilla, kuten selluloosalla, saadaan kuitenkin huomattavasti suurempia N:n arvoja ensimmäisen puristuksen aikana. Esimerkiksi selluloosalla ensimmäisen puristuksen aikana on N yleensä 0,35 ... 0,45 .

Tutkiessaan selluloosan muodostamia kakkuja havaitsi Han /8/, että valkaiseminen nostaa kokoonpuristuvuuskerrointa M. Tämä johtuu luultavasti siitä, että valkaistaessa kimmomoduuli pienenee. Valkaisemattoman selluloosan jauhamisella ei näytä olevan huomattavaa vaikutusta N:ään, mutta se lisää M:ää jonkin verran. Valkaistun selluloosan jauhaminen alhaisessa konsis-



tenssissa ei vaikuta kertoimiin, mutta jauhamisella suuressa konsistenssissa saadaan M kasvamaan, N:n arvon ei ole todettu merkittävästi muuttuvan.

## 2.b Muita kokoonpuristuvuusyhtälöitä

Myöhemmin Ingmanson et al. /16/ laajensivat yhtälön (6) käyttöaluetta ottamalla mukaan termin, joka ilmaisee kakun konsistenssin, kun kuormitus on nolla.

$$(7) \quad \frac{c}{\text{kg/m}^3} - \frac{c_0}{\text{kg/m}^3} = M \left( \frac{P}{\text{N/m}^2} \right)^N$$

$c$  = konsistenssi

$c_0$  = konsistenssi, kun kuormitus on  
nolla

$P$  = kuormitus

$M$  = vakio

$N$  = vakio

Yhtälö (7) on muunnos Van Wyk'in yhtälöstä /17/

$$(8) \quad \left( \frac{c}{\text{kg/m}^3} \right)^3 - \left( \frac{c_0}{\text{kg/m}^3} \right)^3 = \frac{(\rho_f / \text{kg/m}^3)}{K_n (E / \text{N/m}^2)} \frac{P}{\text{N/m}^2}$$

$\rho_f$  = kuidun tiheys



$K_n$  = vakio, jonka suuruus riippuu kuormituksen ja tukipisteiden jakautumisesta kuidussa

$E$  = kimmomoduuli

Wilder /18/ on ottanut mukaan säädettävän parametrin  $\gamma_o$ , jotta käyttöaluetta saataisiin laajennetuksi. Hänen lopullinen yhtälönsä oli

$$(9) \quad \left( \frac{c}{\text{kg/m}^3} \right)^{4\gamma_o-1} - \left( \frac{c_o}{\text{kg/m}^3} \right)^{4\gamma_o-1} =$$

$$\frac{M_o \left( \frac{e_f}{\text{kg/m}^3} \right)^5 (4\gamma_o-1)}{K_n \left( \frac{E}{\text{N/m}^2} \right) \left( \frac{c_o}{\text{kg/m}^3} \right)^{6-4\gamma_o}}$$

$M_o$  = vakio

$\gamma_o$  = parametri

Han /8/ on vertaillut yhtälöitä (7) ja (9) kokeellisiin tuloksiin, jotka Jones /15/ oli saanut mekaanisesti vakioituneille lasikuitu- ja sulfaattisellulosaakakuille. Kun  $P$  on suuri korreloivat kaavat ja koe-tulokset tyydyttävästi, mutta pienillä kuormituksen arvoilla esiintyi huomattava poikkeama. Alhaisilla kuormituksen arvoilla oli yhtälö (9) parempi kuin yhtälö (7).



Lähtien liikkeelle Onogi-Sasagurin teorian /19/ yksinkertaisimmasta muodosta on Han /8/ johtanut seuraavan kokoonpuristuvuusyhtälön

$$(10) \quad \frac{\left(\frac{c}{\text{kg/m}^3}\right)^3 - \left(\frac{c_0}{\text{kg/m}^3}\right)^3}{\left(\frac{\rho_f}{\text{kg/m}^3}\right)^3} =$$

$$\frac{M'}{\alpha(1 \pm \beta) \left(\frac{c_0/\text{kg/m}^3}{\rho_f/\text{kg/m}^3}\right)^2} \left(\frac{P/\text{N/m}^2}{E/\text{N/m}^2}\right)^{1 \pm \beta}$$

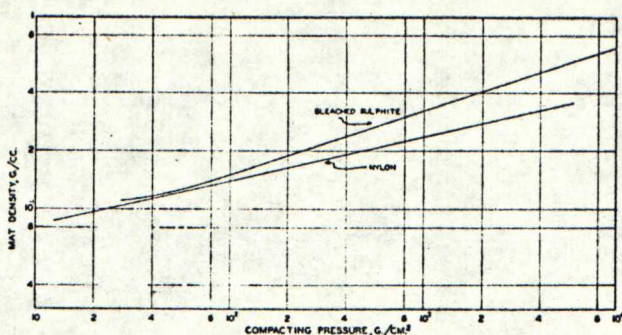
$\alpha$  = parametri

$\beta$  = parametri

$M'$  = vakio

Kun  $c \gg c_0$  saadaan yhtälöistä (7,9,10) yhtälö (6). Han /8/ on osoittanut, että yhtälö (6) on käyttökelpoinen vielä kuormituksen arvoilla  $10^6 \text{ N/m}^2$ . Tämä havaitaan myös kuvassa [10] esitetyistä sulfiittiselluloosalla ja nylonilla tehdyistä kokeista.





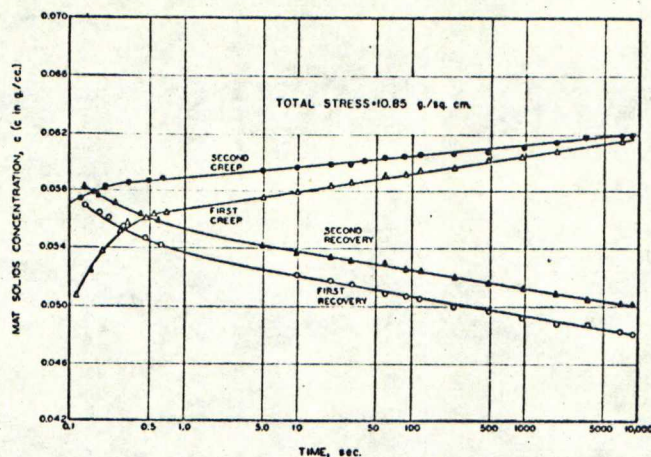
Kuva 10. Kuitukakkujen kokoonpuristaminen

### 3. Ryömintä

Mikäli kokoonpuristavan rasituksen annetaan vaikuttaa pitkän aikaa, havaitaan tiheyden kasvavan vaikka rasituksen suuruus pidetään koko ajan samana. Tätä ajasta riippuvaa muutosta kutsutaan ryöminnäksi.

Laajimman tutkimuksen ryöminnästä on suorittanut Wilder /18/ antamalla suhteellisen pienien voimien  $0,5 \dots 9 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$  vaikuttaa selluloosakakkuihin pitkän ajan. Jo Seborg et al. havaitsivat muutoksen ja palautuvuuden olevan riippuvaisia kuormituksen vaikutusajasta (kuvat [1,2,3,4]). Myös Jones /15/ havaitsi kuormituksen vaikutusajan merkityksen. Kuva [11] esittää tyypillistä Wilderin saamaa ryömintä-palautus-käyrää.





Kuva 11. Ryömintä-palautus-  
käyrä

Aikaisemmin esitetyissä kokoonpuristuvuusyhtälöissä ei ole otettu huomioon ajan vaikutusta muutokseen. Wilder on ottanut yhtälöön (7) mukaan aikariippuvuustermi seuraavasti:

$$(11) \quad M = T + U \log(t/s)$$

$M$  = vakio

$T$  = vakio

$U$  = vakio

$t$  = aika

jolloin yhtälö (7) saa muodon

$$(12) \quad \frac{c-c_0}{\text{kg/m}^3} = \left[ T + U \log(t/s) \right] \left( \frac{P}{N/m^2} \right)^N$$



$P$  = rasitus

$N$  = vakio

$c$  = konsistenssi

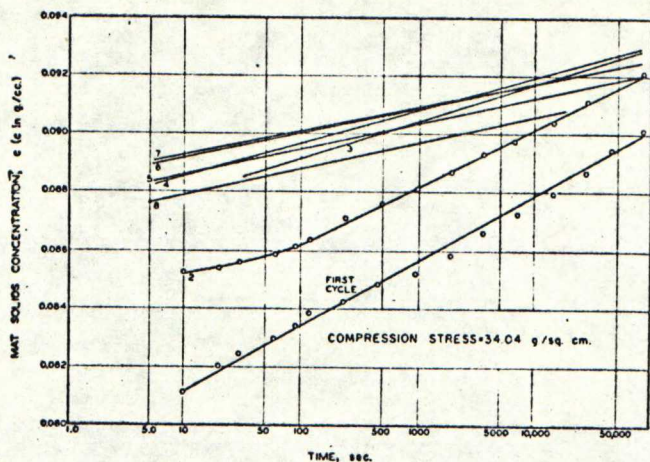
$c_0$  = konsistenssi, kun rasitus on nolla

#### 4. Mekaaninen vakioituminen

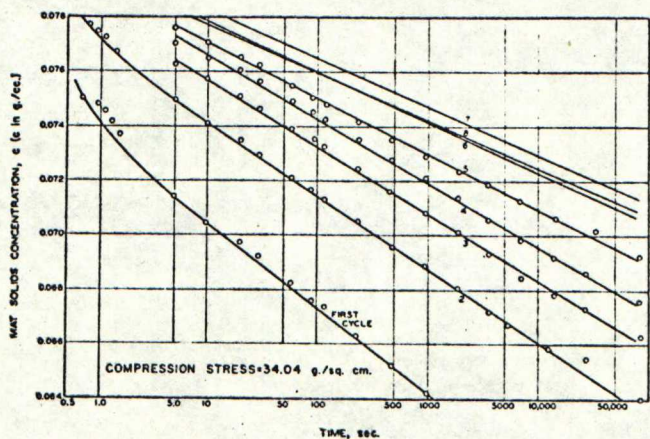
Jos samaan kuitujen muodostamaan verkkorakenteeseen kohdistetaan useita kertoja peräkkäin rasitusta ja palautusta, saavuttaa kakku ennen pitkää tilan, jossa peräkkäisiä puristuksia kuvaavat käyrät  $c = f(P)$  yhtyvät. Selluloosakakun käyttäytymistä peräkkäisissä rasitus-palautus-kokeissa kuvaavat kuvat [12] ja [13] . Silloin kun käyrät likimain yhtyivät, määritteli Wilder /18/ kakun olevan mekaanisesti vakioituneessa tilassa. Tällöin ei enää tapahdu palautumatonta muutosta.

Wilder määritteli vakiot yhtälölle (12) sekä ensimmäiselle puristukselle ja palautukselle että mekaanisesti vakioituneen tilan puristukselle ja palautukselle. Kokeissa käytettiin koemateriaalina laboratoriossa valmistettua sulfaattiselluloosaa. Kuten kuvista [12] ja [13] havaitaan, tarvitsi hänen suorittaa ainakin kuusi rasitus-palautus-koetta saavuttaakseen mekaanisesti vakioituneen tilan.





Kuva 12.  
Selluloosakakun  
käyttäytyminen pe-  
rättäisissä rasi-  
tuskokeissa



Kuva 13.  
Selluloosakakun  
käyttäytyminen pe-  
rättäisissä palau-  
tuskokeissa

## 5. Kokoonpuristuksen mekanismi

Han /8/ on esittänyt, että puristuksen aikana kuitu-  
verkossa tapahtuu seuraavanlaisia muutoksia:

- 1) Kosketuskohtien lukumäärä kasvaa kuitujen taipuessa.  
Tämän vahvisti Elias /7/ tutkiessaan lasikuituja. La-  
sikuiduilla, joiden pituus oli 2,26 mm kasvoi keski-



määräinen kosketuskohtien lukumäärä 7,3:sta 12,6:een kiinteän aineen osuuden kasvaessa 0,031:stä 0,545:een.

2) Kuitujen asema muihin kuituihin nähden muuttuu. Pidetään puristavan männän suuntaa z-akselina ja kohtisuorassa männän suuntaa vastaan olevaa tasoa xy-tasona. Elias totesi valokuvaustekniikallaan, että kuitujen asema xy-tasossa ei muuttunut mainittavasti peräkkäisten puristusten aikana. Hän havaitsi kuitenkin, että kuidun muodostama kulma xy-tasoon nähden muuttui puristuksen aikana kakun kiinteän aineen osuuden kasvaessa. Jos kuormittamattomassa kakussa (kiinteän aineen osuus =  $\nu_0$ ) kuitu on orientoitunut kulman  $\varphi_0$  verran vaakatasoon nähden, on se orientoitunut kiinteän aineen osuuden ollessa  $\nu$ , kaavan (13) osoittaman kulman  $\varphi$  verran.

$$(13) \quad \varphi = \arcsin [(\nu_0/\nu) \sin \varphi_0]$$

Elias totesi tutkimuksissaan kaavan pitävän paikkansa suhteen  $\nu_0/\nu$  arvoon 0,444 saakka.

### 3) Muodonmuutokset kuidussa

Joutuessaan puristuksen alaiseksi voi kuidussa tapahtua muodonmuutoksia. Taipumisen lisäksi voi kuidun pituus muuttua, ja kokoonpuristavat voimat voivat aiheuttaa kuitujen kosketuskohdissa poikkileikkauksen



litistymistä. Kuitujen poikkileikkauksen pienenemisestä on seurauksena tiiviimpi verkkorakenne.

Turvonnut kuitu sisältää huokosissaan turvottavaa nestettä. Kun turvonnutta kuitua puristetaan, puristuu osa turvottavasta nesteestä ulos kuidusta. Tämä poistuminen tapahtuu voimakkaimmin kuitujen kosketuskohdissa samanaikaisesti kun kuitujen poikkileikkaus muuttuu. Kokoonpuristus saa siis turvonneilla kuiduilla aikaan muutoksia sekä kakun huokoisuudessa että kuitujen ominaistilavuudessa. Näillä tekijöillä on erilainen riippuvuus kokoonpuristavasta kuormituksesta, eikä näiden kahden tekijän vaikutusta voida erottaa toisistaan nykyisellä tekniikalla.

Juuri kosketuskohdissa tapahtuvan poikkileikkauksen muodonmuutoksen ja kuivumisen vaikutuksesta saadaan selluloosalla aikaisemmin mainitut suuret  $N:n$  arvot, suuremmat kuin mitä pelkkä kuitujen taipuminen saa aikaan.

## 6. Palautumattomat muutokset

Hanin /8/ mukaan palautumattomiin muutoksiin ovat syynä seuraavat neljä tekijää:



- 1) kuidun muodonmuutokset kosketuskohdissa
- 2) kuitujen liukuminen toisten ohi kosketuskohdissa
- 3) kuitujen orientoitumisen muuttuminen xy-tasoon nähden
- 4) väliainevirtauksen viskoosinen vaikutus

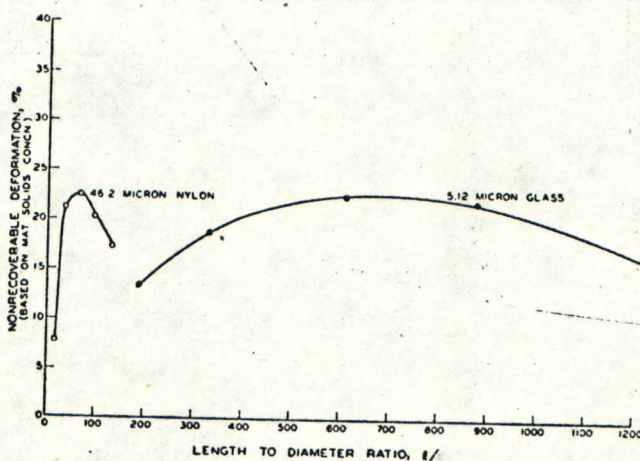
Hystereesi-ilmiön suuruus on riippuvainen edellämainituista neljästä tekijästä. Mikäli elastisilla kuiduilla ei olisi kitkaa, ei havaittaisi myöskään hystereesi-ilmiötä. Koska selluloosakuidut ovat huomattavasti viskoelastisempia kuin tekokuidut, havaitaan selluloosakuiduilla myös huomattavasti selvempi hystereesi-ilmiö. Kitkatekijöiden vaikutus kokoonpuristuksessa ei ole pelkästään riippuvainen kuidun pinnan laadusta, vaan myös väliaineella on huomattava merkitys kitkan suuruuteen. Tämän on osoittanut Elias tutkimuksissaan, joiden tuloksia Hän on referoinut.

Jonesin /15/ mukaan selluloosalla suurin syy hystereesi-ilmiöön ovat ajasta riippuvat muodonmuutokset ja palautuvuudet kuidussa eikä kuitujen välinen kitka. Ensimmäisen puristuksen aikana tapahtuvasta palautumattomasta muutoksesta osa johtuu pysyvistä muodonmuutoksista selluloosakuiduissa. Synteettisten kuitujen muodostamisessa kakuissa palautumaton muutos johtuu



lähinnä kuitujen liukumisesta toistensa ohi.

Jones on osoittanut palautumattoman muutoksen suuruuden olevan riippuvainen kuitujen pituus/halkaisija-suhteesta. Palautumattoman muutoksen prosenttinen määrä näyttää saavuttavan maksimin kriittisellä  $l/d$  suhteella (kuva [14])



Kuva 14. Palautumattoman muutoksen suuruus  $l/d$  suhteen funktiona

Mikäli kuiduilla on hyvin pieni  $l/d$  suhde, pääsevät ne liukumaan toistensa ohi jo muodostettaessa suodatamalla laimeasta suspensiosta kokoonpuristettavaa kakkua. Tällaiset kuidut muistuttavat käyttäytymiseltään enemmän kokoonpuristumattomia sylintereitä kuin taipuisia kuituja.

Suurimmat muutokset verkkorakenteessa puristuksen ai-



kana tapahtuvat, kun kuitujen  $l/d$  on lähellä kriittistä arvoa. Tällöin muodostuu kakun suodatuksen aikana löysä verkkorakenne, jota kokoonpuristettaessa tapahtuu suuria muutoksia. Kun  $l/d$  arvo on huomattavasti suurempi kuin kriittinen arvo, aiheuttaa kokoonpuristaminen lähinnä vain taipumista kuiduissa. Äärettömän pitkien kuitujen muodostamissa verkkorakenteissa ei näin ollen esiintyisi ollenkaan palautumattomia muutoksia. Jones /15/ vahvisti tämän olettamuksen tutkimalla pitkiä nylonkuituja, joiden voidaan katsoa olevan äärettömän pitkiä verrattuna koelaitteen halkaisijaan.

## 7. Nopeat muutokset

Kaikki palautumattomat muutokset ovat ajasta riippuvaisia. Aikaisemmin esitetyt Wilderin /18/ tutkimukset samoin kuin muutkin edellä esitetyt tutkimukset pitävät paikkansa mikäli muutokset ovat hitaita. Jos kakkuun kohdistetaan nopeasti suuri rasitus, on seurauksena nesteen äkillinen poistuminen verkkorakenteesta, niin että siinä esiintyy voimakkaita muutoksia, tai verkkorakenne voi hajota. Tällaisessa tapauksessa eivät edellä esitetyt kokoonpuristuvuusyhtälöt pidä paikkaansa.



### C. Kokoonpuristuminen virtauskitkan vaikutuksesta

Staattisessa kokoonpuristuksessa, jota edellä on käsitelty, välittyvät kokoonpuristavat voimat ainoastaan kuitujen kosketuskohtien kautta. Kun kokoonpuristuksen aiheuttavat virtaavan väliaineen aiheuttamat kitkavoimat, vaikuttavat nämä pitkin kuidun pituutta. Jos kuitu oletetaan palkiksi, aiheuttaa siinä kosketuskohtien kautta välittyvä pistekuorma suuremman taipumisen kuin kitkavoimien aiheuttama jatkuva kuorma. Tämän mukaan aiheuttaisivat tietyn suuruiset kitkavoimat pienemmän muutoksen kuin samansuuruinen staattinen rasitus.

Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa, koska kitkavoimat ovat kumulatiivisia. Tiettyyn kakun sisällä olevaan kuitukerrokseen vaikuttavat sekä kitkavoimat tässä kerroksessa että ylempiin kerroksiin vaikuttaneet kitkavoimat, jotka välittyvät samalla tavalla kuitujen kosketuskohtien kautta kuin staattinen kuormitus.

Kun kuituihin vaikuttavat kitkavoimat tulevat tietysti paikassa pieniksi verrattuna niihin voimiin, jotka välittyvät ylemmistä kerroksista kosketuskohtien välityksellä, muistuttaa kuormituksen jakautuminen enemmän staattista kuin dynaamista tilannetta. Joten mitä tiheämpi kakku on sitä enemmän kitkavoimien aiheutta-



ma kokoonpuristuminen muistuttaa staattisen kuorman aiheuttamaa kokoonpuristuvuutta.

Tässä tapauksessa on johdettu yhtälö kokoonpuristukselle virtauskitkan vaikutuksesta lähtien liikkeelle yhtälöstä (6)

$$(14) \quad \frac{c^0}{\text{kg/m}^3} = \frac{2-3N}{2-N} M \left( \frac{\Delta P}{\text{N/m}^2} \right)^N$$

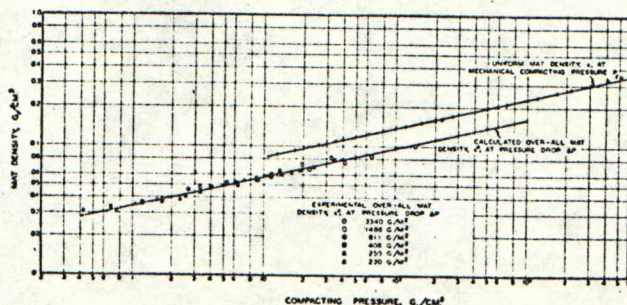
$c^0$  = kakun keskimääräinen konsistenssi

$M$  = vakio

$N$  = vakio

$\Delta P$  = painehäviö kakun yli

Yhtälön (14) kuvaaja on suora koordinaatistossa  $\log c^0 - \log (\Delta P)$  ja sen on todettu /8/ yhtyvän hyvin nylonilla saatuihin kokeellisiin tuloksiin (kuva [15]). Kuvassa ylempi viiva kuvaa staattisista kokoonpuristuvuuskokeista saatuja tuloksia.



Kuva 15.

Kakun tiheys kakun yli vaikuttavan paine-eron funktiona



## D. Selluloosakakkujen viskoelastisuus

### 1. Tiheiden kakkujen viskoelastisuus

#### 1.a Yleistä

Jos sinimuotoinen rasitus  $r = r_0 \sin(2\pi ft)$  kohdistetaan viskoelastiseen materiaaliin, on seurauksena sinimuotoinen muutos kakussa. Jos kyseessä on leikkausrasitus, voidaan määritellä /20/ kompleksinen leikkausmoduuli seuraavasti

$$(15) \quad \frac{\text{rasitus}}{\text{muutos}} = G(j\omega) = G'(\omega) + jG''(\omega)$$

$G(j\omega)$  = kompleksinen leikkausmoduuli

$G'(\omega)$  = kompleksisen leikkausmoduulin  
reaaliosa

$G''(\omega)$  = kompleksisen leikkausmoduulin  
imaginaariosa

$\omega$  = kulmanopeus

Kompleksisen leikkausmoduulin reaaliosa kuvaa viskoelastisen materiaalin "kiinteän aineen tyyppistä leikkausmoduulia" ja imaginaariosa "nesteentyyppistä leikkausmoduulia".



$G''$  voidaan kirjoittaa

$$(16) \quad G''(\omega) = \eta'(\omega)$$

$$\eta'(\omega) = \text{dynaaminen viskositeetti}$$

Kurath /20/ määrittelee myös häviötangentin

$$(17) \quad \tan(\tau) = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)}$$

$$\tan(\tau) = \text{häviötangentti}$$

Häviötangentin suuruus on riippuvainen kakun yhden värähdyksen aikana menettämästä ja varastoimasta energiasta

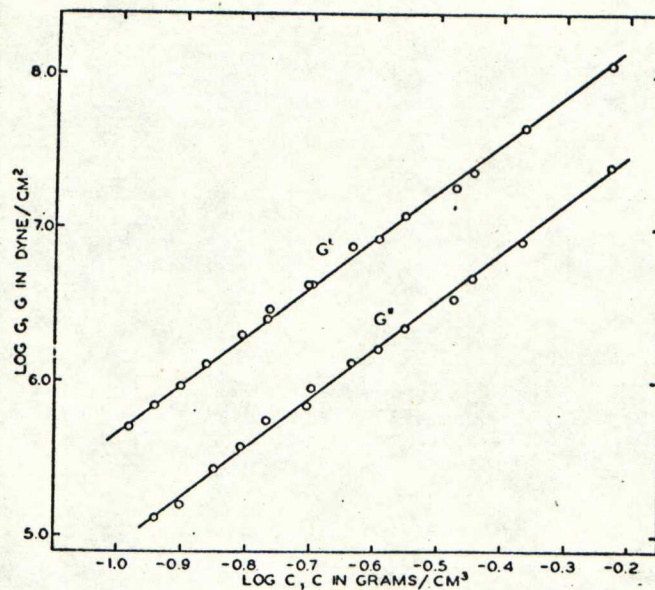
$$(18) \quad \frac{\text{menetetty energia}}{\text{varastoitu energia}} = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)}$$

Tutkiessaan leikkausrasituksen vaikutusta normaalirasituksen alaisiin selluloosakakkuihin havaitsi Kurath /20/, että tiheysalueella 0,106 ... 0,590 g/cm<sup>3</sup> ei värähdystaajuudella alueella 6...1000 Hz ollut huomattavaa vaikutusta  $G'(\omega)$ :n ja  $G''(\omega)$ :n arvoihin.



1.b Viskoelastisuuden ja kokoonpuristuvuuden analogia tiheillä kakuilla

Tiheyden vaikutusta kompleksisen leikkausmoduulin komponentteihin kuvaa oheinen kuva [16] Kurath'in tutkimuksista.



Kuva 16. Kaku tiheyden vaikutus leikkausmoduulin komponentteihin

Kuvasta [16] havaitaan, että tutkittavalla alueella voidaan esittää:

$$(19) \quad \frac{c}{\text{kg/m}^3} = M_1 \left( \frac{G'}{\text{N/m}^2} \right)^{N_1}$$



$$(20) \quad \frac{c}{\text{kg/m}^3} = M_2 \left( \frac{G''}{\text{N/m}^2} \right)^{N_2}$$

Näin ollen voidaan määritellä kompleksiselle leikkausmoduulille yhtälö

$$(21) \quad \frac{c}{\text{kg/m}^3} = M_3 \left( \frac{G}{\text{N/m}^2} \right)^{N_3}$$

Yhtälöissä (19), (20) ja (21) on

$c$  = kakun tiheys

$G^i$  = leikkausmoduuli tai sen komponentti

$M_i$  = vakio

$N_i$  = vakio

Mikäli yhtälöitä (19), (20) ja (21) verrataan yksinkertaisimpaan kokoonpuristuvuusyhtälöön (6), havaitaan näiden yhtälöiden olevan analogisia muodoltaan. Kurath /20/ on määrittänyt käyttämälleen laboratoriossa valmistetulle sulfaattiselluloosalle yhtälöiden (6), (19) ja (20) vakiot

Taulukko I

yhtälö	kerroin	eksponentti
6	$M = 0,00555$	$N = 0,302$
19	$M_1 = 0,00154$	$N_1 = 0,319$
20	$M_2 = 0,00263$	$N_2 = 0,321$



Leikkausmoduulin, sen komponenttien ja kokoonpuristavan kuorman dimensiona edellä esitetyn taulukon arvoja laskettaessa on ollut dyne/cm<sup>2</sup>. Koska yhtälöille (19) ja (20) saatiin likimain samat eksponentin arvot, voidaan pitää yhtälön (18) ilmaisemaa mekaanista häviötangenttia tiheydestä riippumattomana.

Edellä esitetyn analogian perusteella esitti Kurath, että sekä kokoonpuristuksen aiheuttama rasitus että kompleksinen leikkausmoduuli voidaan esittää funktion  $Q(F,n)$  avulla seuraavasti

$$(22) \quad Q(F,n) P_0 = P$$

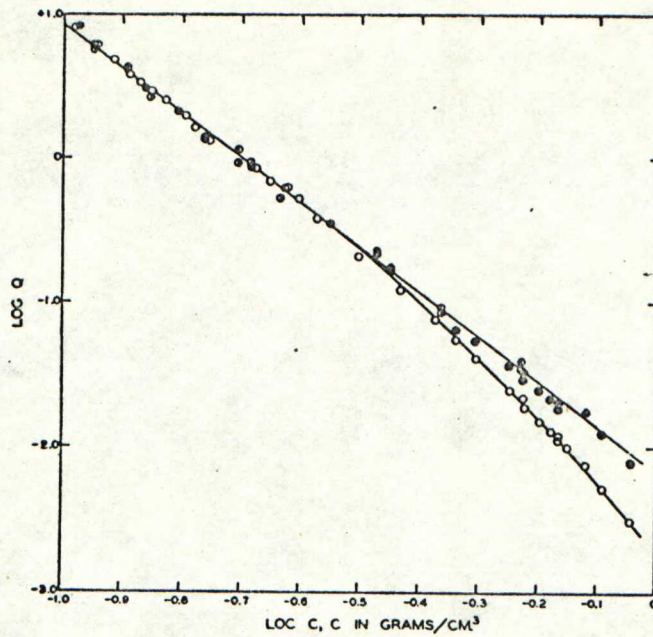
$$(23) \quad Q(F,n) G(j\omega)_0 = G(j\omega)$$

$P_0$  = rasitus mielivaltaisessa referenssitiheydessä

$G(j\omega)_0$  = kompleksinen leikkausmoduuli mielivaltaisessa referenssitiheydessä

Funktio  $Q(F,n)$  on sama molemmissa yhtälöissä, ja se on riippuvainen kosketuskohtien lukumäärästä  $n$  ja kitkan suuruudesta  $F$ . Sekä  $n$  että  $F$  ovat taas riippuvaisia kakun tiheydestä. Kuvassa [17] on esitettyä funktion  $Q(F,n)$  riippuvuus kakun tiheydestä





Kuva 17. Funktion  $Q(F,n)$  riippuvuus  
kakun tiheydestä

Kuvasta [17] huomataan, että kun  $c < 0,318$  ( $\log c < -0,5$ ) saadaan  $Q(F,n)$ :lle melko tarkasti samat arvot sekä dynaamisista kokeista että kokoonpuristuvuusko-  
keista.

Mikäli otetaan huomioon ryömintäilmiön vaikutus, voi-  
daan johtaa /20/ märeille selluloosakakulle eräänlai-  
nen reologinen tilanyhtälö, jonka voidaan ajatella  
olevan muotoa

$$(24) \quad c = Q(F,n) R(t) R_0$$

$c$  = kakun tiheys



$R(t)$  = ajasta riippuva funktio, joka  
kuvaa yksittäisen kuidun viskoelastisia ominaisuuksia

$R_0$  = kompleksinen leikkausmoduuli tai  
normaali rasitus tietyssä referenssitiheydessä

## 2. Laimeitten kakkujen viskoelastisuus

### 2.a Yleistä

Laimeitten selluloosasuspensioiden viskoelastisia ominaisuuksia ovat tutkineet Attanasio et al. /21/ ja Wahren et al. /22,23,24,25,6/.

Attanasion käyttämässä laitteistossa oli amplitudi niin suuri, että kokeita voidaan tosiaan pitää dynaamisina kokeina. Väliaineena käytettiin tutkimuksissa erilaisia glukoosin vesiliuoksia, jolloin pystyttiin tutkimaan väliaineen vaikutusta. Käytetty selluloosa oli yleensä sulfiittiselluloosaa ja sen konsentraatio suspensiossa 1 paino-%.

Wahren et al:n suorittamissa kokeissa oli amplitudi niin pieni laitteiston muihin mittoihin nähden, että kokeita voidaan pitää puolistaattisina. Väliaine-



na käytettiin vettä ja tutkittavana materiaalina käytettiin joko tekokuituja tai erilaisia selluloosamassoja.

Molemmissa tutkimuksissa havaittiin kvalitatiivisesti samanlainen leikkausmoduulin riippuvuus kuitujen konsentraatiosta. Kun kuitujen painokonsentraatio oli likimain 5% havaitsivat Attanasio et al. voimakkaan vähenemisen kimmomoduulin kasvussa. Wahren et al. eivät havainneet näin jyrkkää kasvun alenemista. Attanasio et al. havaitsivat leikkausmoduulin olevan melko selvästi riippuvaisen taajuudesta, kun taas Kurath /20/ tutkiessaan tiheitä suspensioita ei havainnut voimakasta riippuvuutta. Tulosten erilaisuus voi johtua joko siitä, että käytetyt laitteet olivat erilaiset tai sitten Kurath'in käyttämissä suurissa konsentraatioissa ei enää esiinny taajuusriippuvuutta.

## 2.b Viskoelastisuuden ja kokoonpuristuvuuden analogia laimeilla kakuilla

Thalén ja Wahren /24/ havaitsivat seuraavanlaisen yhteyden leikkausmoduulin ja painokonsentraation välillä laimeissa suspensioissa

$$(25) \quad \frac{G}{N/m^2} = G_0 (m - m_s)^{N'}$$



$G$  = leikkausmoduuli

$m$  = paino-osuus

$m_s$  = sedimentaatiopaino-osuus

$G_0$  = vakio

$N'$  = vakio

Myös leikkauslujuudelle saatiin samanlainen riippuvuus painokonsentraatiosta. Mikäli yhtälöstä (25) ratkaistaan  $c$ , saadaan

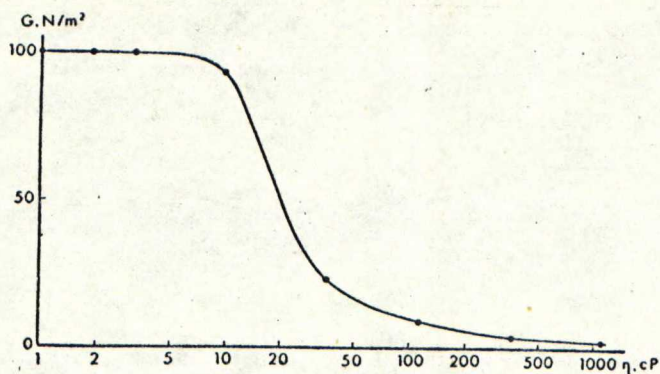
$$(26) \quad m = m_s + \frac{1}{(G_0)^{1/N'}} \cdot (G)^{1/N'}$$

Yhtälö (25) on muodoltaan analoginen yhtälön (7) kanssa. Thalén ja Wahren /24/ ovat havainneet, että  $1/g:n$  arvot ovat suunnilleen yhtä suuret kuin eräille selluloosalaaduille saadut /14/  $N:n$  arvot.

#### E. Väliaineen vaikutus

Tutkittaessa /3, s 179/ väliaineen viskositeetin vaikutusta leikkausmoduuliin on saatu oheisen kuvan [18] osoittama riippuvuus. Tutkittavana materiaalina on ollut Perlon-kuitujen muodostama suspensio eri väkelyisissä sokeriliuoksissa. Kuitujen tilavuuskonsentraatio suspensiossa on ollut koko ajan 1,5 tilavuus-%.





Kuva 18. Väliaineen viskositeetin vaikutus leikkausmoduuliin

Kuvasta [18] havaitaan, että kun viskositeetti kasvaa tarpeeksi suureksi pienenee leikkausmoduuli hyvin jyrkästi pienellä viskositeettialueella. Näin ollen väliaineella on ilmeisesti liukastava vaikutus kuitujen kosketuskohtiin kun viskositeetti on tarpeeksi suuri. Tällöin kosketus ei ole enää jäykkä ja koko rakenne voi muuttua nopeasti.

Mitkään kokoonpuristuvuus- ja leikkausmoduulikaavat eivät ota suoranaisesti huomioon tätä väliaineen liukastavaa vaikutusta. Näin ollen yhtälöitten vakiot on määritettävä kullekin väliaineelle ja väliaineen viskositeettialueelle erikseen.



## KOKEELLINEN OSA

### I. TYÖN TARKOITUS

Työn tarkoituksena oli tutkia DI R. Seppäsen suunnitteleamalla laitteistolla virtausmäärän ja kakun korkeuden vaikutusta painehäviöön veden virratessa paksun selluloosakakun lävitse. Samalla tutkittiin painehäviön jakautumista kakussa ja kokonaispainehäviön vaikutusta kakun keskimääräiseen konsistenssiin.

Samalla laitteistolla suoritettiin myös pesukokeita ja määritettiin Järveläisen ja Nordénin /26/ matemaattiseen malliin tarvittavat parametrit kyllästämällä ensin kakku merkkiaineella, jona käytettiin n. 1 paino-% kaliumkloridiliuosta. Hetkellä  $t = 0$  muutettiin konsentraatiota yläpinnalla porrasvasteen mukaisesti. Pesun edistymistä seurattiin määrittämällä johtokykykenon avulla kakusta poistuvan liuoksen konsentraatio ajan funktiona. Tässä osassa tutkittiin kakun paksuuden, pesuliuoksen virtausnopeuden ja kokonaispainehäviön vaikutusta pesuun.



## A. Geometrinen malli

Huokoisen aineen pesulle, jonka sisältämän pestävän liuoksen konsentraatio on  $K_0$ , ovat Järveläinen ja Nordén esittäneet geometrinen mallin /26/. Pesu suoritetaan liuoksella, jonka konsentraatio on  $K_w$ , suihkuttamalla pesuliuosta tasaisesti kakun päälle ja pitäen virtausmäärä vakiona  $\dot{V}$ . Nesteen ajatellaan poistuvan kakusta jatkuvasti ilman katkeamia. Pesun aikana kakun kulloinkin sisältämän nestemäärän voidaan ajatella jakautuneen kahteen osaan; osa nesteestä sijaitsee virtauskanavissa, joiden tilavuus on  $V_1$  ja loput nesteestä poikittaiskanavissa, joiden tilavuus on  $V_2$ . Kaiken virtauksen oletetaan tapahtuvan virtauskanavissa, poikittaiskanavissa neste pysyy paikallaan. Pestävän aineen poistumisen poikittaiskanavista ajatellaan tapahtuvan diffuusion vaikutuksesta, ja poikittaisdiffuusio virtauskanavissa oletetaan niin nopeaksi, että virtauskanavien poikkileikkauspinnolla ei esiinny konsentraatioeroja.

## B. Kirjallisuuden tutkimukset painehäviöstä

Kirjallisuudessa on esitetty suhteellisen vähän tietoutta matemaattisista menetelmistä kokonaispainehäviön ja painehäviön jakautuman laskemiseksi kuitujen ominaisuuksien perusteella.



Lähtien liikkeelle Darcy'n laista ja Kozeny-Carmanin yhtälöstä johtivat Ingmanson et al. /27/ seuraavan yhtälön painegradientille

$$(26) \quad \frac{d(\Delta P)}{dH} = \left( \frac{\eta \dot{V} S_v^2}{A} \right) \left( \frac{s (1-\epsilon')^2}{\epsilon'^3} \right)$$

$\eta$  = viskositeetti

$\dot{V}$  = virtausmäärä

$S_v$  = ominaispinta-ala

$A$  = laitteen pinta-ala

$s$  = Kozenyn kerroin

$\epsilon'$  = huokoisuus

$\Delta P$  = kokonaispainehäviö

$H$  = kakun korkeus

Davies /28/ on johtanut seuraavanlaisen riippuvuuden Kozenyn kertoimen ja huokoisuuden välille

$$(27) \quad s = \frac{w \epsilon'^3}{(1-\epsilon')^{1/2}} (1 + q(1-\epsilon')^3)$$

Ingmanson et al. /27/ ovat määrittäneet vakioille  $w$  ja  $q$  seuraavat arvot

$$w = 3,5$$

$$q = 57$$



Sijoittamalla yhtälö (27) yhtälöön (26) saadaan

$$(28) \quad \frac{d(\Delta P)}{dH} = \left( \frac{\eta \dot{V} S_v^2 w}{A} \right) (1-\epsilon')^{3/2} (1+q(1-\epsilon')^3)$$

Mikäli huokoisuus on suurempi kuin 0,9 , on tekijän  $(1+q(1-\epsilon')^3)$  arvo likimain yksi. Näin ollen saadaan

$$(29) \quad \frac{d(\Delta P)}{dH} = \left( \frac{\eta \dot{V} S_v^2 w}{A} \right) (1-\epsilon')^{3/2}$$

Sijoittamalla huokoisuuden määritelmä

$$(30) \quad \epsilon' = 1 - v c$$

$v$  = ominaistilavuus

$c$  = konsistenssi

yhtälöön (6) ja tulos yhtälöön (29) voidaan näin saatu yhtälö integroida, jolloin saadaan teoreettinen riippuvuus suhteellisen painehäviön  $\Delta p/\Delta P$  ja suhteellisen kakun korkeuden  $h/H$  välillä.

Mikäli integroinnin alarajaa approksimoidaan kakun tiheydellä, kun puristava paine on nolla, saadaan yhtälöstä (29)

$$(31) \quad \frac{\Delta p}{\Delta P} = \left( \frac{h}{H} \right)^{2/(2-3N)}$$



$\Delta p$  = painehäviö etäisyydellä h kakun  
pinnasta

$\Delta P$  = kokonaispainehäviö

H = kakun kokonaiskorkeus

Mikäli huokoisuus on pieni on yhtälön (29) johdossa poisjätetty termi otettava mukaan. Sijoittamalla vielä yhtälö (30) yhtälöön (28) saadaan

$$(32) \quad \frac{d(\Delta P)}{c^{3/2} dH} = \left( \frac{\eta \dot{V} S_v^2 w v^{3/2}}{A} \right) (1 + q v^3 c^3)$$

ratkaisemalla saadaan

$$(33) \quad \frac{\int_0^{\Delta P} \frac{d(\Delta p)}{c^{3/2} (1 + q v^3 c^3)}}{\int_0^{\Delta P} \frac{d(\Delta P)}{c^{3/2} (1 + q v^3 c^3)}} = \frac{h}{H}$$

Yhtälön (33) integrointi voidaan suorittaa vain graafisesti.

Yhtälön (32) kanssa analogisen yhtälön ovat johtaneet myös Grén et al. /29/. Molemmat tutkijaryhmät ovat suorittaneet myös kokeita ja havainneet melko hyvän korrelaation edellä esitettyjen kaavojen ja kokeellis-



ten tulosten kanssa.

Painehäviökokeitten tarkoituksena oli saada kokeellista aineistoa DI R. Seppäsen lisensiaattityötä /30/ varten, ja suorittaa vertailu kokeellisten tulosten ja teoreettisten laskelmien välillä.

## II KÄYTETTY LAITTEISTO

### A. Yleistä

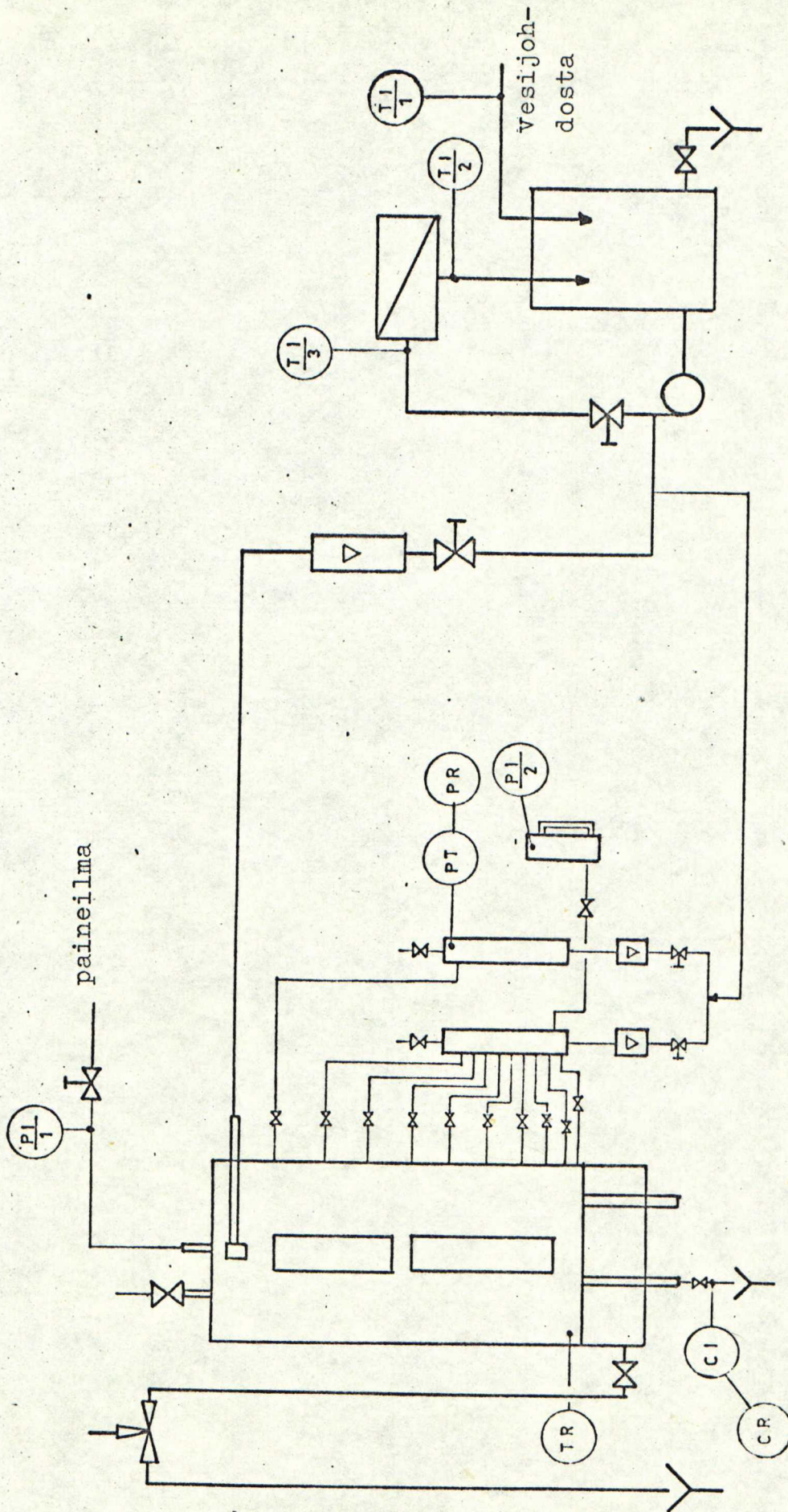
Käytetty laitteisto on rakennettu pääosiltaan Kymi Oy:n Kuusankosken tehtailla, muutokset ja eräät osat on valmistettu Kemian osaston työpajassa. Kuvassa [19] on esitettyä kaavakuva laitteistosta ja kuvassa [20] kaavakuva käytetystä pesukolonnist. Seuraavassa tarkastellaan laitteiston eri komponentteja tarkemmin.

### B. Laitteiston osat

#### 1. Nesteen syöttö

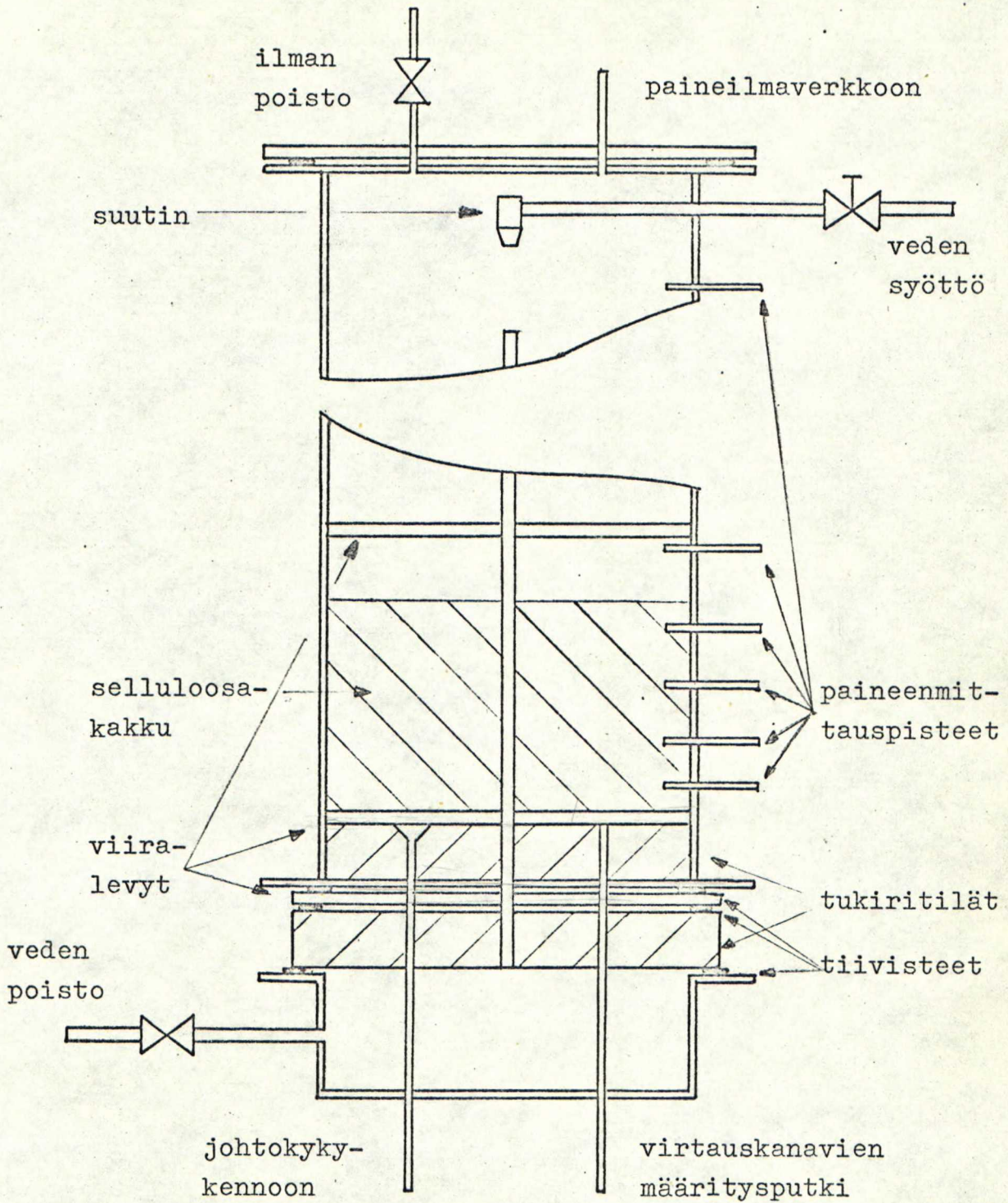
Käytetty vesi otettiin vesijohtoverkosta sekoitushanan kautta. Sekoitushanan jäljessä olleen lämpömittarin avulla säädettiin syöttö sopivaan lämpötilaan. Syöttö johdettiin pumppaussäiliöön, jonka tilavuus





Kuva 19. Kaavakuva koelaitteistosta





Kuva 20. Kaavakuva pesukolonnista



oli n. 80 litraa. Säiliöstä pumpattiin vesi kiertolinjaan, josta otettiin tarvittava virtaus pesukolonniin. Käytetty pumppu oli Garvenswerken valmistama keskipaikoispumppu malli ML 4012/3 virtausmäärä 90 l/min ja nostokorkeus 34 m. Kiertolinjassa olleen venttiilin avulla säädettiin virtausvastus pumpun painepuolella sellaiseksi, että kolonnin syöttölinjaan saatiin paine sopivaksi virtauksen säätöä varten. Kiertolinjassa oli myös grafittilämmönvaihdin kiertoveden lämmittämiseksi, mutta koska osoittautui mahdottomaksi lämmittää selluloosaa tasalämpöiseksi, käytettiin noin huoneenlämpöistä vettä.

## 2. Virtauksen säätö

Virtausmäärä pesukolonniin mitattiin Fischer-Porterin valmistamalla rotametrilla B 6 A - 25 - A. Virtausmäärä säädettiin syöttölinjassa ennen rotametriä olleella istukkaventtiilillä.

## 3. Pesukolonne

Pesukolonnin kaavakuva on esitetty kuvassa [20]. Se on sisähalkaisijaltaan 300 mm ja valmistettu ruostumattomasta teräsputkesta. Sisätilan korkeus on n. 780 mm. Kannen ja pohjan kiinnitystä varten kolonnin molemmissa päissä oli kauluslaipat. Kannessa oli lii-



täntämahdollisuus paineilmaverkkoon ja venttiili ilman poistoa varten. Kolonnin keskiviivalla n. 50 mm kanasta alaspäin oli liitäntä suuttimelle, jonka suihkukulmaa voitiin säätää.

Pestävä selluloosakakku asetettiin viiralevylle. Tämä viiralevy samoin kuin sitä tukeva ristikko sijaitsivat kolonnin sisällä. Ristikon alapuolella oli toinen viiralevy, joka tuki kolonnin alapäässä olleeseen kaukukseen, toinen tukiritilä, johon oli kiinnitetty keskustappi, ja pohja, joka oli valmistettu samanlaisesta putkesta kuin varsinainen kolonni. Selluloosakerroksen yläpuolella oli irroitettava kolmas viiralevy, joka kiinnitettiin keskustappiin. Tämän levyn avulla estettiin suuttimen suihkun osuminen suoraan kakkuun, jolloin pinnasta olisi muodostunut epätasainen.

Kaikki viiralevyt oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä, pyöreitten reikien halkaisija oli n. 1 mm ja reikien pinta-ala 7% kokonaispinta-alasta. Viiralevyn paksuus oli n. 1,5 mm. Tukiritilät olivat normaalia 30 mm:n askelritilää.

Keskustappi oli halkaisijaltaan n. 18 mm ja siihen oli sorvattu kierre, jolloin ylälevyn avulla voitaisiin kakkua puristaa kasaan. Tällaisia kokeita ei kuitenkaan suoritettu.



Selluloosakakun tarkkailua ja pinnankorkeuden havaitsemista varten oli kolonni varustettu näkölasilla, jonka korkeus oli n. 670 mm ja leveys n. 50 mm. Suunnilleen näkölasin puolivälissä kulki tukirauta. Näkölasiin oli merkittynä myös korkeusasteikko.

Selluloosakakkua tukevan viiralevyn alapuolelle ulotuivat putket, joiden avulla suoritettiin virtauskanavien tilavuuden ja konsentraation määrittäminen. Virtauskanavien määrittämistä varten varattu putki oli sisähalkaisijaltaan 13 mm ja se voitiin sulkea alapäässä olleella kumikorkilla. Konsentraation mittausta varten oli putki (sisähalkaisija 5 mm), jonka yläpäässä oli pieni kartio. Putken alapäästä johdettiin virtaus johtokykennoon kumiletkulla. Välissä oli letkunsuljin, jonka välityksellä virtaus voitiin avata ja säätää sopivaksi.

#### 4. Pesuliuksen poisto

Pesuliuos poistui pohjan sivussa olleesta putkesta ylöspäin kolonnin kannessa olleen ilmanpoisteventtiilin kanssa samalla korkeudella olleen kolmitiehanan kautta viemäriin. Kolmitieventtiilin yksi kanava oli auki ilmaan, jolloin viemäriin vievässä putkessa ei syntynyt imua. Tällä tavalla saatiin säädettyä poisto pesukolonnista yhtä suureksi kuin syöttö. Poistoputkessa oli sulkuventtiili, jonka ollessa kiinni estyi



virtaus kakun läpi kolonnin täyttövaiheen aikana.

### 5. Paineen mittaus

Paineen mittaus tapahtui pesukolonnissa olleista paineenmittauspisteistä, joita oli 10 kappaletta molemmilla puolilla kolonnia. Selvyyden vuoksi kolonnin kaavakuvaan [20] on piirretty paineenmittauspisteet vain toiselle puolelle kolonnia. Mittauksissa käytettiin vain toisen puolen mittauspisteitä, koska paineenmittaussysteemejä oli vain kaksi, ja toisella näistä oli valvottava koko ajan kokonaispainetta.

Paineenmittauspisteet oli valmistettu sisähalkaisijaltaan 1,5 mm putkista, joiden pituus oli n. 100 mm. Putkien ulkohalkaisija oli 6 mm. Putket olivat 9 - 10 mm kolonnin sisällä. Sijoittamalla putkien päät kolonnin sisälle toivottiin välttävän seinämaefekteiltä. Paineenmittausputkien etäisyydet viiralevystä, jonka varaan kakku asetettiin, olivat: 12, 24, 42, 65, 98, 143, 203, 292, 421 ja 582 mm.

Paineenmittauspisteistä johtivat kumiletkut umpinaiseen paineenkeräysputkeen, jonka halkaisija oli 52 mm ja korkeus 440 mm. Paineenkeräysputken ja mittauspisteitten välillä käytettiin sulkemiseen aluksi kevytrakenteisia venttiilejä, mutta kun osoittautui, ettei-



vät niiden tiivistet kestäneet, siirryttiin käyttämään letkunsulkijoita. Paineenkeräysputkien yläpäässä oli venttiilit ilmanpoistoa varten. Paineenmittaussysteemit täytettiin vedellä, joka saatiin kolonin syöttölinjasta pienten rotametrien kautta. Kummallakin paineenmittaussysteemillä oli omat paineenkeräysputkensa.

Kokonaispaineen mittaukseen käytetyssä mittauspiirissä paine mitattiin Siemensin paine-erolähettimellä Teleperm M 730 - A7, mittausalue 500 - 6400 mm H<sub>2</sub>O, käyttäen verkkolaitteena Siemensin Teleperm M 906 - A1 verkkolaitetta. Painesignaali rekisteröitiin Goerzin Servogor 2 tyyppi RE 520 kompensatiopiirturilla.

Kokonaispaineen ja painejakautuman mittaamiseen käytettiin Valmetin Torrex manometria, jossa oli mahdollisuus käyttää vesi-, tetraetylbromidi- tai elohopeapatsaita. Tetraetylbromidipatsaan maksiminäyttämä oli 4500 mm H<sub>2</sub>O, joten sitä voitiin käyttää suurimmassa osassa mittauksista. Suuria paineita mitattaessa käytettiin elohopeapatsasta. Lukemat saatiin kaikilta manometriputkilta suoraan millimetreinä vesipatsasta. Tässä paineenmittauspiirissä oli lisäksi paineenmuutosputki, jossa nesteessä kulkeva paineviesti muutettiin ilmassa kulkevaksi paineviestiksi. Putken halkaisija oli 50 mm ja korkeus 570 mm. Nestepatsaan korkeuden



määrittämistä varten oli putki varustettu näkölasilla ja korkeusasteikolla. Koska kolonnin rakenne esti sijoittamasta paineenmittauspistettä kakkua tukeneen viiralevyn alapuolelle, käytettiin paine-eron määrittäksessä referenssipaineena ilman painetta.

Pesukokeita ja pesukolonnin tyhjennystä varten oli kolonnin kansi varustettu paineilman liitännämahdollisuudella. Paineen säätö suoritettiin halutusta paineesta riippuen jommallakummalla kahdesta paineenalennusventtiilistä, joihin oli kytketty Valmetin painemittarit (asteikot 0 - 0,6 kp/cm<sup>2</sup> tai 0 - 2,5 kp/cm<sup>2</sup>).

#### 6. Konsentraatiomittaukset

Konsentraatiomittaukset perustuivat poistuvan liuoksen johtokyvyn mittaamiseen. Tämä suoritettiin antamalla liuoksen virrata omalla hydrostaattisella paineellaan Radiometer CDM 104 johtokykykennon lävitse. Johtokyvyn mittaamiseen käytettiin Radiometer CDM 2 johtokykymittaria ja rekisteröintiin Micrograph BD 123 - E606 piirturia.

#### 7. Lämpötilamittaukset

Vesijohtoverkosta tulevan veden lämpötilaa mitattiin lämpömittarilla ja säädettiin sekoitushanalla. Kierto-



linjassa oli lämpötila-anturit lämmönvaihtimen molemmin puolin. Lämpötilan ilmaisuun käytettiin United Systems Co.:n Digitec malli 501s näyttölaitetta. Seluloosakakusta poistuvan veden lämpötila mitattiin rauta-konstantaani termoelementillä ja rekisteröitiin Honeywell Elektronik 19 piirturilla. Lämpöanturi oli kakun sisällä 1 - 2 cm päässä viiralevystä.



### III MITTAUSTEN SUORITTAMINEN

#### A. Yleistä

##### 1. Käytetty selluloosa

Käytetty selluloosa oli Kymi Oy:n Kuusankosken tehtaitten valmistamaa puolivalkaistua koivusulfaattiselluloosaa. Tällaiselle selluloosalle on määritetty seuraavat arvot:

$$N = 0,333$$

$$M = 5,2$$

$$\text{ominaispinta-ala} = 3,80 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$\text{ominaistilavuus} = 2,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

Selluloosa oli toimitettaessa n. 17 paino-% suspensiona.

##### 2. Tutkitun kakun valmistaminen

Painehäviömittauksissa otettiin toimitetusta suspensiosta tarvittavan suuruinen erä, jonka jälkeen siihen lisättiin vettä niin että sen sellupitoisuus oli n. 6 paino-%. Pesukokeissa jouduttiin käyttämään selluloosaa, jota oli jo aikaisemmin käytetty painehäviö- tai pesukokeissa. Kuitenkin pyrittiin samaan koesarjaan kuuluvat kokeet suorittamaan kakuilla, joihin oli koh-



distettu aikaisemmin mahdollisimman samanlainen rasitus. Myös pesukokeissa käytettiin kolonnin täyttämiseen n. 6 paino-% suspensiota.

Ennen kolonnin täyttämistä täytettiin pohja vedellä, ja mahdollisesti viiralevyn alle jääneet ilmakuplat tärisytettiin pois. Pohja täytettiin niin, että veden raja nousi n. 5 mm viiralevyn yläpuolelle. Tämän jälkeen laitettiin kolonniin em. suspensio, jota oli sekoitettu niin että kosteus olisi mahdollisimman tasainen. Laimennuksen tarkoituksena oli estää selluloosaa imemästä itseensä pohjalta vettä. Täytön jälkeen laitettiin selluloosakakun yläpuolelle n. 5 cm päähän ylin viiralevy ja kiinnitettiin suutin ja kansi.

## B. Pesukokeiden suorittaminen

### 1. Kakun vakioiminen

Edellä mainittujen toimenpiteiden jälkeen alettiin kolonniin syöttää vettä syöttölinjaa pitkin pitäen kannessa ollutta ilmanpoistiventtiiliä auki. Kun nesteen pinta oli noussut melkein kanteen saakka avattiin vedenpoistoputkessa ollut sulkuventtiili. Kolonnin täytettyä vedellä suljettiin ilmanpoistohana, jolloin



vesi alkoi virrata selluloosakerroksen läpi.

Piirturilta seurattiin painehäviön kehittymistä mittaamalla kolonnin yläosassa vallitseva paine ylimmästä paineenmittauspisteestä. Kun kakku oli vakioitunut, jolloin painehäviö ei enää muuttunut, siirryttiin mittaamaan painehäviötä kakun sisältä siinä mittauspisteessä, joka oli lähinnä kakun yläpintaa. Tässä pisteessä painehäviö oli 50 - 200 mm H<sub>2</sub>O pienempi kuin kokonaispainehäviö.

Kun painehäviö oli saatu määritettyä kakun sisällä olleessa mittauspisteessä, suljettiin syöttö ja kytkettiin paineilma kannessa olleeseen liitántään. Tämän jälkeen alettiin poistaa vettä kolonnista paineilman avulla pitäen painetta mittauspisteessä samana kuin aikaisemmin havaittu paine. Samanaikaisesti täytettiin syöttösäiliö ja lisättiin siihen veteen liuotettua kaliumkloridia niin että muodostui n. 1 paino-% KCl-liuos.

Tyhjennyksen aikana avattiin myös johtokykykennoon vievässä letkussa ollut letkunsulkija, niin että vettä alkoi virrata käynnistetyn johtokykykennon lävitse.



## 2. Kakun kyllästäminen

Kun nesteen pinta oli laskenut kakun yläreunan korkeudelle, alettiin syöttää suuttimen kautta kaliumkloridiliuosta. Kyllästysliuoksen syöttöä pesukolonnin pidettiin jonkin verran suurempana kuin kakun läpi menevä virtaus, niin että nesteen pinta kolonnissa nousi hitaasti. Paineenalennusventtiilin avulla pidettiin kolonnissa vaikuttava paine, joka aiheutti virtauksen kakun läpi, samana kuin vakioimisen lopussa mitattu paine.

Kun massakerroksesta poistuvan liuoksen johtokyky oli vakioitunut (piirturilla ei havaittu enää muutosta), suljettiin virtaus kakun läpi estämällä virtaus johtokykykennoon ja sulkemalla poistoputkessa oleva venttiili. Saman aikaisesti suljettiin myös paineilma-venttiili ja avattiin ilmanpoistovenktiili. Liuoksen syöttöä kolonniin jatkettiin kuitenkin niin kauan kunnes nestepinta oli 20 - 30 cm päässä kakun yläpinnasta. Tämän jälkeen suljettiin syöttö, tyhjennettiin syöttösäiliö ja paineilman avulla syöttölinja ja kiertolinja kaliumkloridiliuoksesta, jonka jälkeen syöttösäiliö täytettiin vesijohtoverkosta. Nestepinnan nostamiseen kolonnissa, putkistojen ja syöttösäiliön tyhjentämiseen ja syöttösäiliön täyttämiseen meni aikaa 7 - 10 minuuttia. Tänä aikana pääsi kakku laajenemaan.



Syöttösäiliön täyttymisen jälkeen suljettiin ilmanpoistuventtiili, avattiin paineilmahana, poistoputken venttiili ja virtaus johtokykykennoon. Paine säädettiin samaksi kuin aikaisemmin havaittu paine. Kun virtaus kakun läpi alkoi, puristui kakku melkein välittömästi samaan korkeuteen kuin sillä oli ennen paineen poistamista.

### 3. Varsinainen pesu

Kun nestepinta oli laskenut kakun yläreunan tasalle avattiin syöttö. Paine pidettiin edelleen samana ja virtausmäärä vähän suurempana kuin kakun läpi menevä virtausmäärä. Melkein välittömästi puhtaan veden syötön aloituksen jälkeen alettiin ottaa talteen massakerroksen läpi mennyttä liuosta. Kun konsentraation muutos oli tapahtunut, lopetettiin ensiksi suodoksen talteenotto, jonka jälkeen suljettiin virtaus johtokykykennon läpi ja lopuksi puhtaanveden syöttö pesukolonniin. Tässä vaiheessa oli nesteen pinta 5 - 10 cm kakun yläpuolella.

### 4. Pesuvakioitten määrittäminen

#### 4.a Virtauskanavien määrittäminen

Kakun yläpuolella oleva vesi painettiin kakun läpi



samalla paineella, jota aikaisemmin käytettiin pesuun. Kun nestepinta oli kakun yläreunan tasalla, suljettiin poistoputken venttiili ja avattiin virtauskanavien määritysputkessa ollut korkki. Putken läpi tullut vesi otettiin talteen ja sen tilavuus määritettiin. Tämä tilavuus määriteltiin virtauskanavien tilavuudeksi  $V_1$ . Koko ajan pidettiin paineenalennusventtiilin ilmaise-  
ma paine samana kuin pesun aikana.

#### 4.b Poikittaiskanavien määrittäminen

Virtauskanavien määrittämisen jälkeen otettiin kakku pois kolonnista, punnittiin ja sekoituksen jälkeen siitä otettiin 5 - 10 näytettä, joista määritettiin kosteus kuivaamalla niitä uunissa noin vuorokauden ajan lämpötilassa  $105^{\circ}\text{C}$ . Kakun vesisisältö vähennettynä sillä vesimäärällä (900 - 1200 ml), joka meni pohjan täyttämiseen, määriteltiin poikittaiskanavien tilavuudeksi  $V_2$ .

#### 5. Eri pesukokeet

Pesukokeita pyrittiin suorittamaan mahdollisimman laajalla kakun korkeus- ja virtausmääräalueella. Samalla suoritettiin myös seuraavat erityistutkimukset:



## 5.a Virtausnopeuden vaikutuksen tutkiminen

Virtausnopeuden vaikutusta tutkittiin puristamalla kakku kasaan virtausnopeutta nostamalla, kunnes saavutettiin haluttu vakiokorkeus painehäviön vakioituesssa. Käyttämällä näin saatuja virtausnopeuden ja painehäviön arvoja suoritettiin pesu. Haluttu kakun korkeus oli noin 15 cm.

## 5.b Kakun korkeuden vaikutuksen tutkiminen

Tätä tutkittiin vakioimalla kakku tietyllä vakiovirtausnopeudella, jonka jälkeen suoritettiin pesu. Koska pesun aikana virtausnopeutta säädettiin paineen avulla, oli vakiovirtausnopeuden aikaansaaminen vaikeaa. Kuitenkin osassa kokeista on käytännöllisesti katsoen sama virtausnopeus (n. 3 l/min).

## C. Painehäviökokeitten suorittaminen

### 1. Kokonaispainehäviön määrittäminen

Kokonaispainehäviö määritettiin samalla tavalla kuin pesukokeissa seuraamalla piirturilla ylimmästä mitauspisteestä painehäviön kehittymistä. Kun piirturilla ei havaittu enää huomattavaa muutosta avattiin



toiseksi ylimmäisen mittauspisteen hana. Tämä mittauspiste oli kytketty manometriin. Näin saatiin määritettyä kokonaispainehäviö sekä piirturilla että manometrillä. Koska puristettaessa ensimmäistä kertaa kakkua oli havaittavissa ryömintää, jonka suuruus oli 5 - 15 mm H<sub>2</sub>O/min, määritettiin kokonaispaine manometrillä uudelleen kun painehäviöjakautuman mittaukset oli saatu suoritettua. Koko painehäviökokeen aikana pidettiin virtausmäärä mahdollisimman vakiona.

## 2. Painehäviön jakautuman mittaaminen

Kun kokonaispainehäviö oli saatu määritettyä, mitattiin painehäviön jakautuma kakun sisällä olleista paineenmittauspisteistä ylhäältä alaspäin. Mikäli selluloosa oli tukkinut mittausputken, yritettiin se avata vesivirtauksen avulla avaamalla pienen rotametrin venttiili. Tätä ennen suljettiin paineenmuutosputkeen vievässä putkessa ollut venttiili. Mikäli näin aikaansaatu virtaus ei avannut putkea, suoritettiin avaus teräslangan avulla. Tällöin suljettiin paineenkeräysputkeen vievä kumiletku. Ennen mittausta seuraavassa pisteessä suljettiin edellisen pisteen suljin.



### 3. Konsistenssin määrittäminen

Konsistenssin määrittäystä varten painettiin kakun yläpuolella ollut vesi kakun läpi paineilmalla.

Poisoton jälkeen kakku punnittiin, sekoitettiin ja siitä otettiin 5 - 8 näytettä, jotka kuivattiin noin vuorokauden ajan 105 °C lämpöisessä uunissa. Näin saadun kakussa olleen selluloosamäärän ja näkölasissa olleen korkeusasteikon avulla määritettiin kakun konsistenssi.



#### IV TULOKSET

##### A. Pesukokeiden tulokset

##### 1. Tulosten esitystapa

- suhteellinen konsentraatio  $k$

Suhteellisella konsentraatiolla tarkoitetaan tietyllä hetkellä kakusta poistuvan liuoksen konsentraation  $K$  suhdetta alkukonsentraatioon  $K_0$

- dimensioton aika

Dimensioton aika määritellään seuraavasti

$$(34) \quad \Theta = \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon} \frac{\dot{V}}{V_1 + V_2} t$$

- aika  $t$

Aika on nolla sillä hetkellä, kun ensimmäiset pesuve-sipisarot osuvat kakun pinnalle

- kokonaispainehäviö  $\Delta P$

kokonaispainehäviöllä tarkoitetaan sitä kokonaispai-nehäviötä, joka havaittiin kakun ollessa vakioitunut.

##### 2. Tulosten tarkastelu

Pesukokeiden tulokset on esitettyinä kuvissa [21] -



[28] sekä liitteissä 1 - 9

Työssä käytetyn konsentraatioporrassfunktion hyvyys vaihteli eri pesukokeissa riippuen siitä miten hyvin kolonnin syöttölinja saatiin tyhjennettyä kyllästysliuoksesta ja siitä miten hyvin pesuliuoksen syöttö onnistuttiin aloittamaan niin että ensimmäiset pesu-vesipisararat osuivat kakun pinnalle juuri silloin kun kyllästysliuoksen pinta oli laskenut kakun yläpinnan tasalle

## 2.a. Virtausnopeuden vaikutus

Pesunesteen virtausnopeuden vaikutusta pesun edistymiseen kuvaavat kuvat [21] ja [22] sekä liitteet 1 ja 2. Kuvasta [21] havaitaan, että mitä suurempi virtausnopeus on, sitä nopeammin pesu edistyy. Kaksi lähinnä origoa sijaitsevaa käyrää ovat poikkeus tästä, mutta poikkeus johtuu siitä että oikeanpuoleisessa näistä käyristä oli kakun korkeus 15,2 cm kun taas kokeessa, jota vasemmanpuoleinen käyrä esittää, oli kakun korkeus 14,5 cm virtausnopeuksien ollessa melkein samat (4,67 ja 4,59 l/min). Dimensioton aika - suhteellinen konsentraatio - koordinaatistossa käyrät asettuvat niin että mitä suurempi kokonaispainehäviö on ollut sitä lähempänä kokeitten kuvajat ovat origoa. Kuvasta [21]



koe	H cm	$\frac{\Delta P}{N/m^2}$	$\frac{V}{l/min}$
o	1	36900	4,67
□	4	19500	4,59
★	12	16000	4,15
●	20	5600	3,22
□	11	3300	2,23

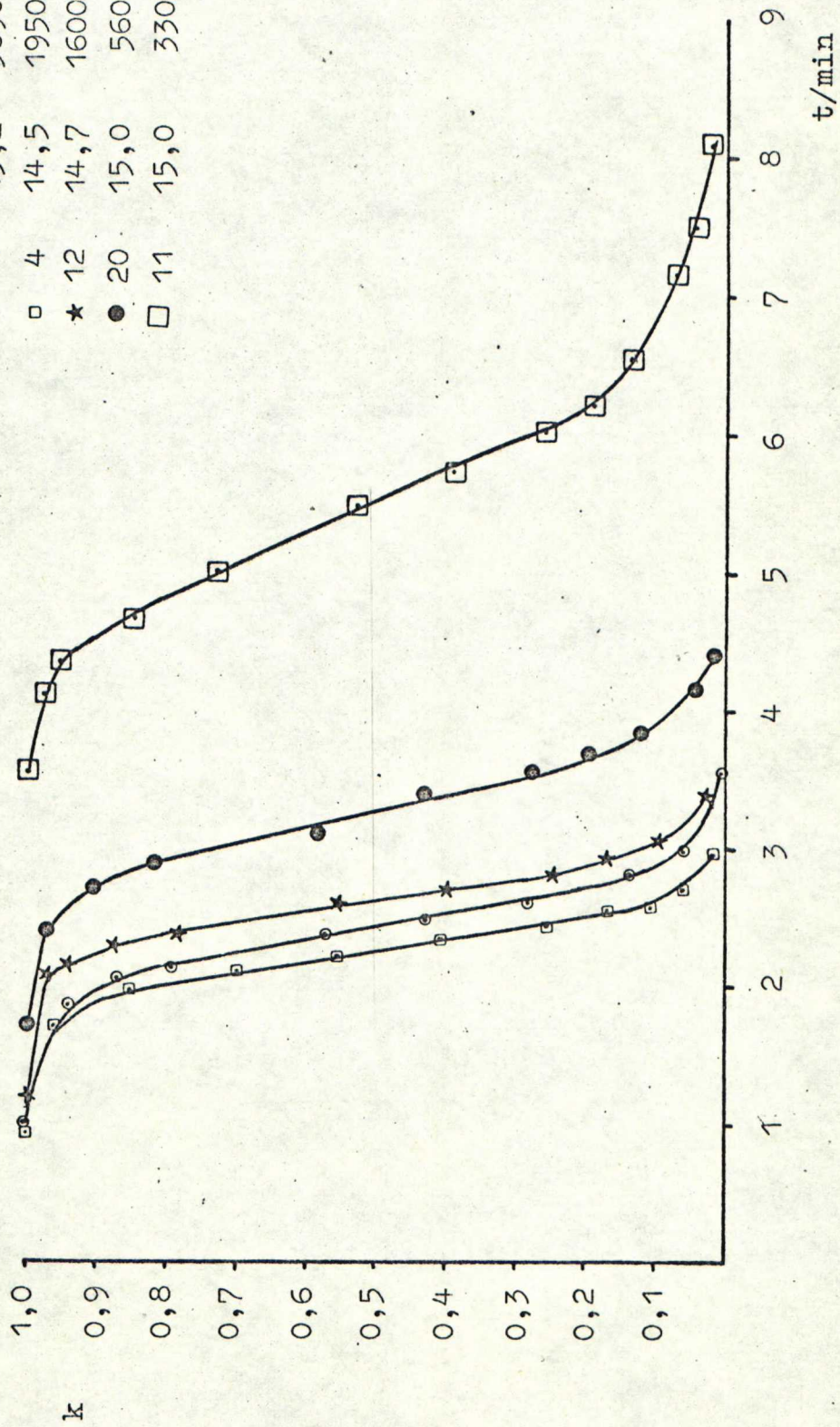
$u/mu/s$

1,1

1,0

0,76

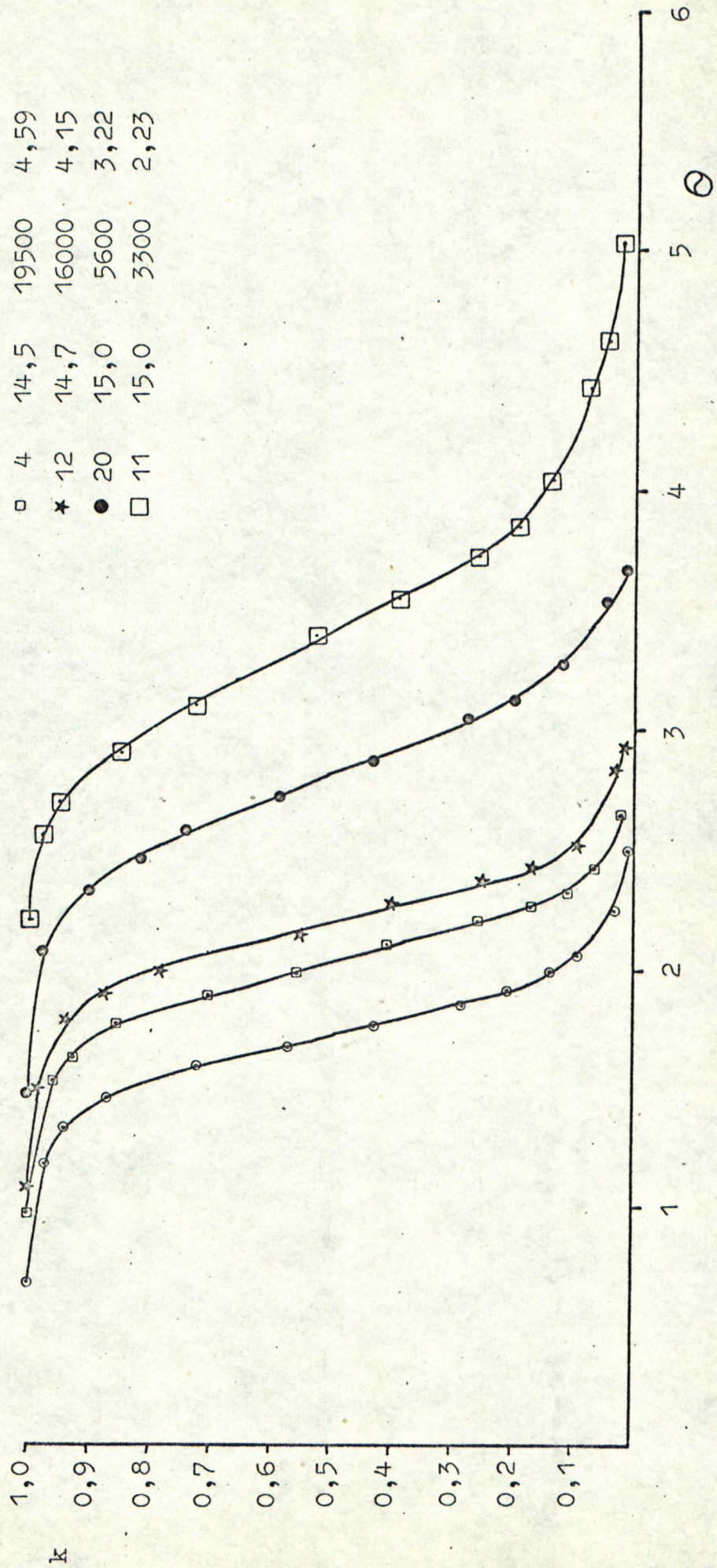
0,5



Kuva 21. Virtausnopeuden vaikutus



koe	H	$\Delta P$	$\dot{V}$
	cm	N/m <sup>2</sup>	l/min
o	15,2	36900	4,67
□	14,5	19500	4,59
★	14,7	16000	4,15
●	15,0	5600	3,22
□	15,0	3300	2,23



Kuva 22. Virtausnopeuden vaikutus



havaitaan, että pienillä virtausnopeuksilla on pesukäyrä loivempi kuin suurilla virtausnopeuksilla. Samanlainen virtausnopeuden vaikutus pesun kuvajaan on havaittavissa kuvasta [22] .

## 2.b Kakun korkeuden vaikutus

Kakun korkeuden vaikutus pesuun selviää kuvista [23] ja [24] sekä liitteistä 3 ja 4. Mitä paksumpi kakku on, sitä loivempi on pesukäyrä. Koska aikaisemmin havaittiin kakun korkeuden ollessa vakio virtausnopeuden pienenemisen vaikuttavan loiventavasti pesukäyrään, voidaan todeta että pesuliuoksen viiveajan kakussa kasvassa loivenee pesukäyrä. Painehäviön vaikutus  $\Theta - k$  koordinaatistossa on sama kuin edellä havaittu, mitä suurempi kokonaispainehäviö on, sitä lähempänä pesun kuvaja on origoa.

## 2.c Kokonaispainehäviön vaikutus

Kokonaispainehäviön vaikutusta pesukäyrän sijaintiin ilmaisee kuva [25] ja liite 5. Parametrina on suhteellisen konsentraation arvo 0,5.

Vaikkakin tuloksissa on melko suuri hajonta, on selvästi havaittavissa painehäviön ja pesukäyrän sijainnin



$\dot{V}$   
l/min

$\Delta P$   
N/m<sup>2</sup>

H  
cm

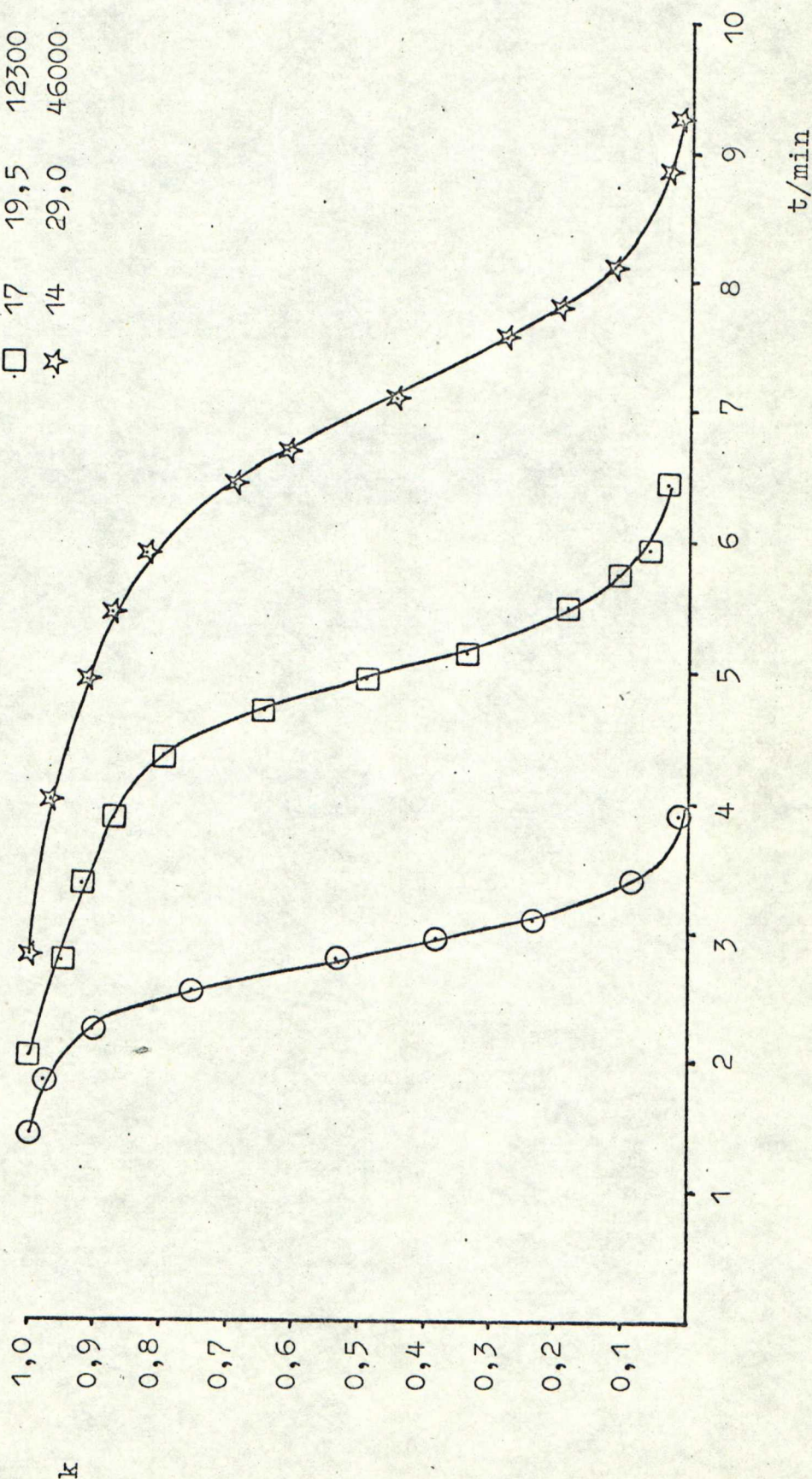
koe

○ □ ☆

3,09  
2,98  
2,98

3500  
12300  
46000

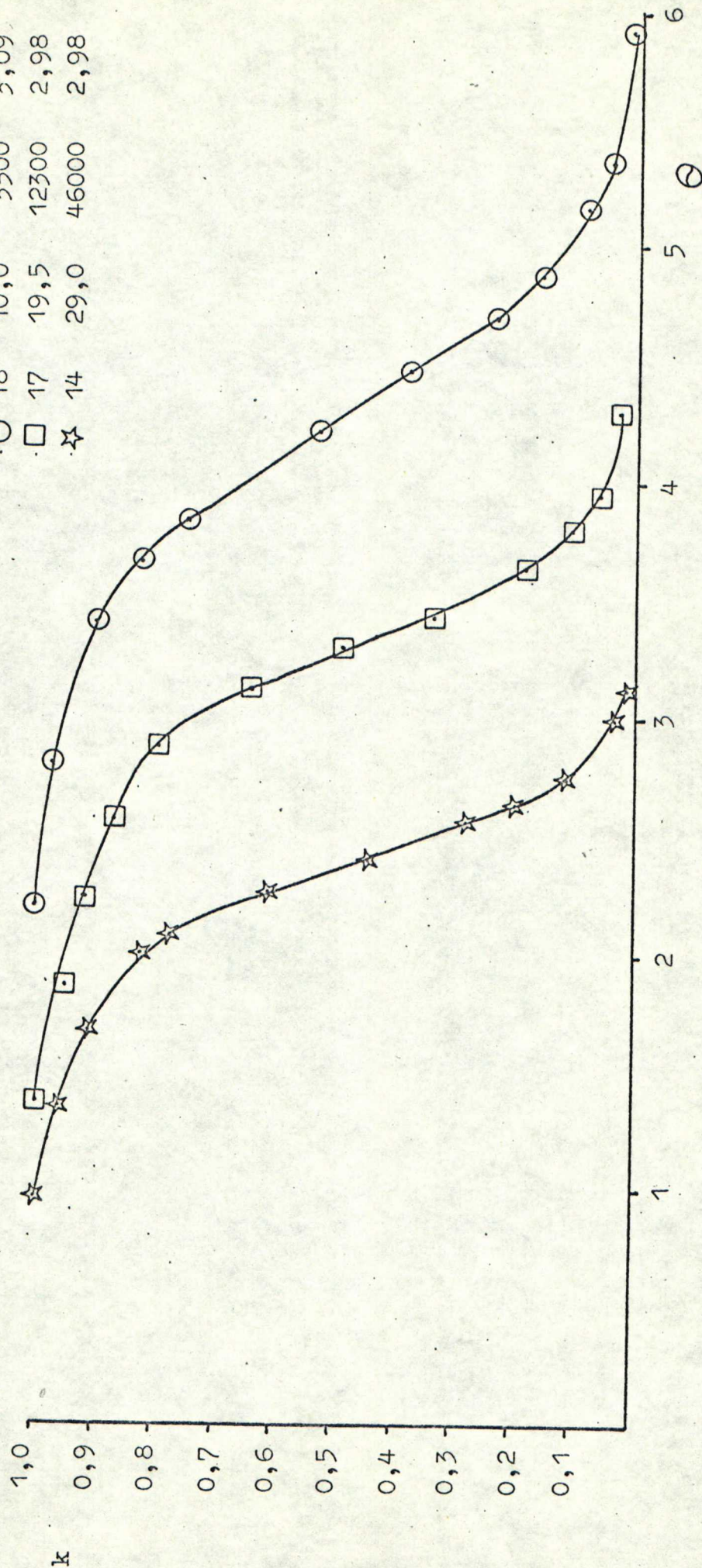
10,0  
19,5  
29,0



Kuva 23. Kakun korkeuden vaikutus

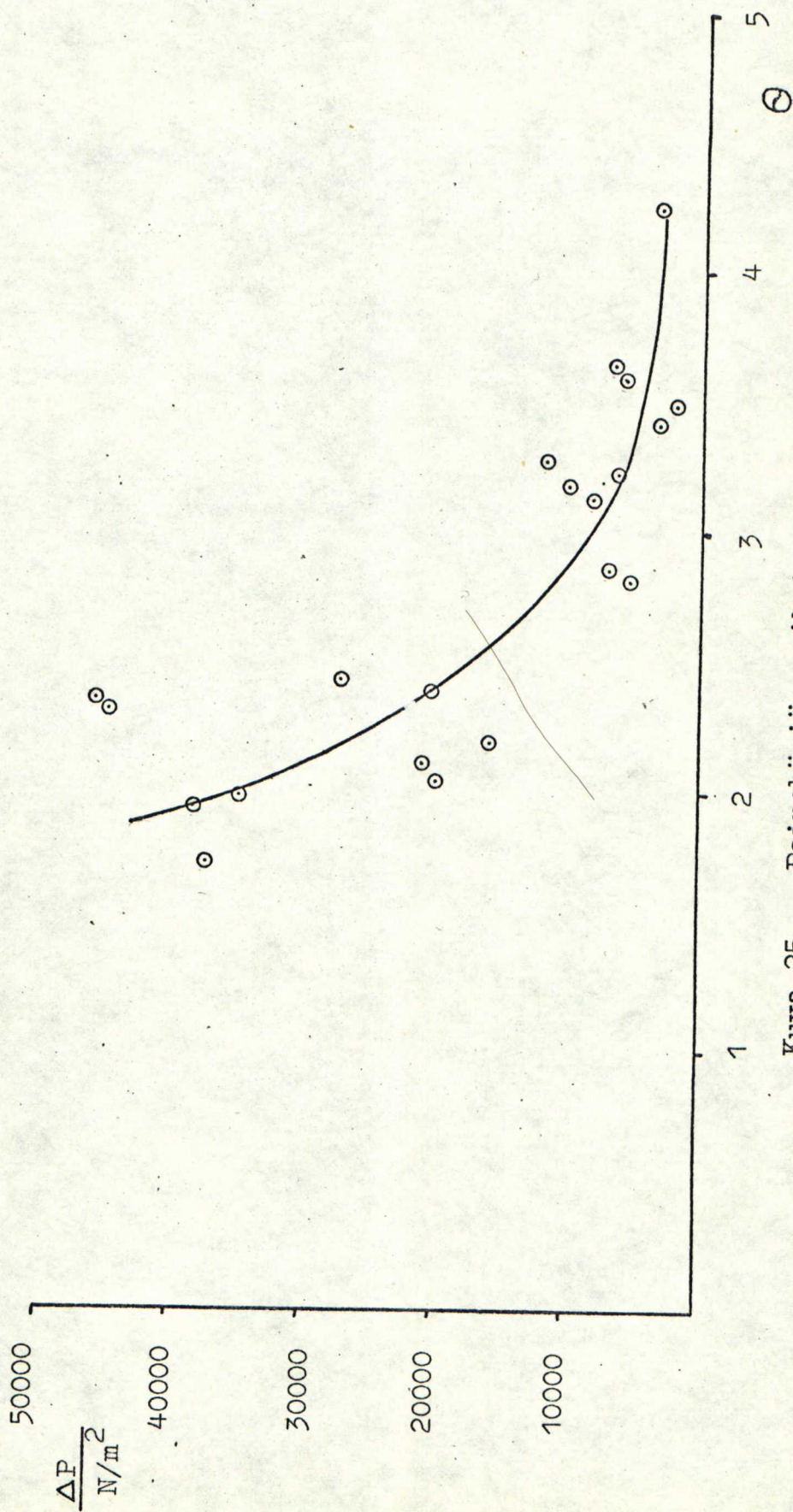


koe.	H	$\Delta P$	$\frac{\dot{V}}{l/min}$
	cm	$N/m^2$	
○ 18	10,0	3500	3,09
□ 17	19,5	12300	2,98
☆ 14	29,0	46000	2,98



Kuva 24. Kakun korkeuden vaikutus

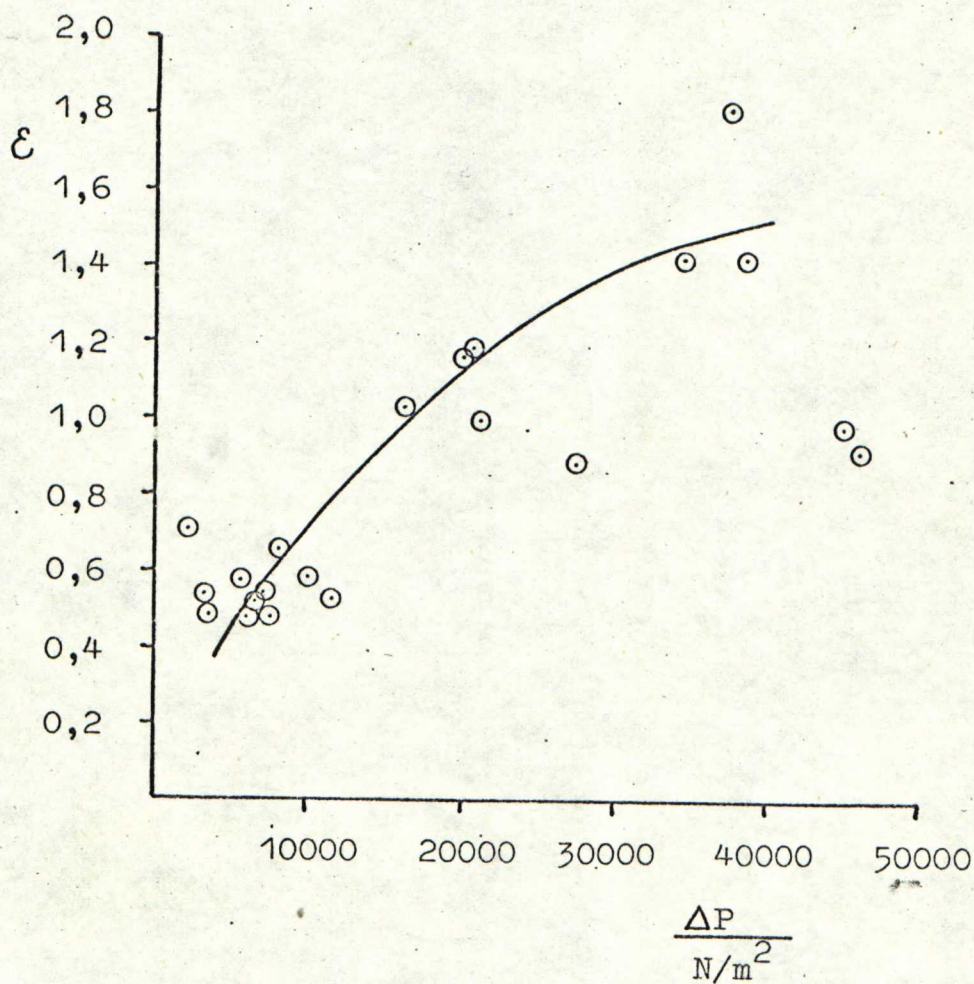




Kuva 25. Painehäviön vaikutus pesukäyrän sijaintiin  
parametrina k:n arvo 0,5



välillä selvä korrelaatio. Tätä korrelaatiota on approksimoitu kuvaan [25] piirretyllä käyrällä. Suuri hajonta voi olla seurausta siitä että pesukokeissa ei käytetty aikaisemmin rasittamatonta selluloosaa. Havaittiin nimittäin, että joko varastoinnilla tai aikaisemmillä rasituksilla on selvä vaikutus selluloosakun painehäviöominaisuuksiin.



Kuva 26.. Tilavuussuhteen riippuvuus kokonaispainehäviöstä



Kokonaispainehäviön ja epsilonin välinen korrelaatio selviää kuvasta [26]. Tässä kuvassa on myös havaittavissa suuri hajonta mittaustuloksissa. Kuitenkin korrelaatio on selvästi nähtävissä.

2.d                      Dimensiottoman ajan ja tilavuussuhteen  
välinen riippuvuus

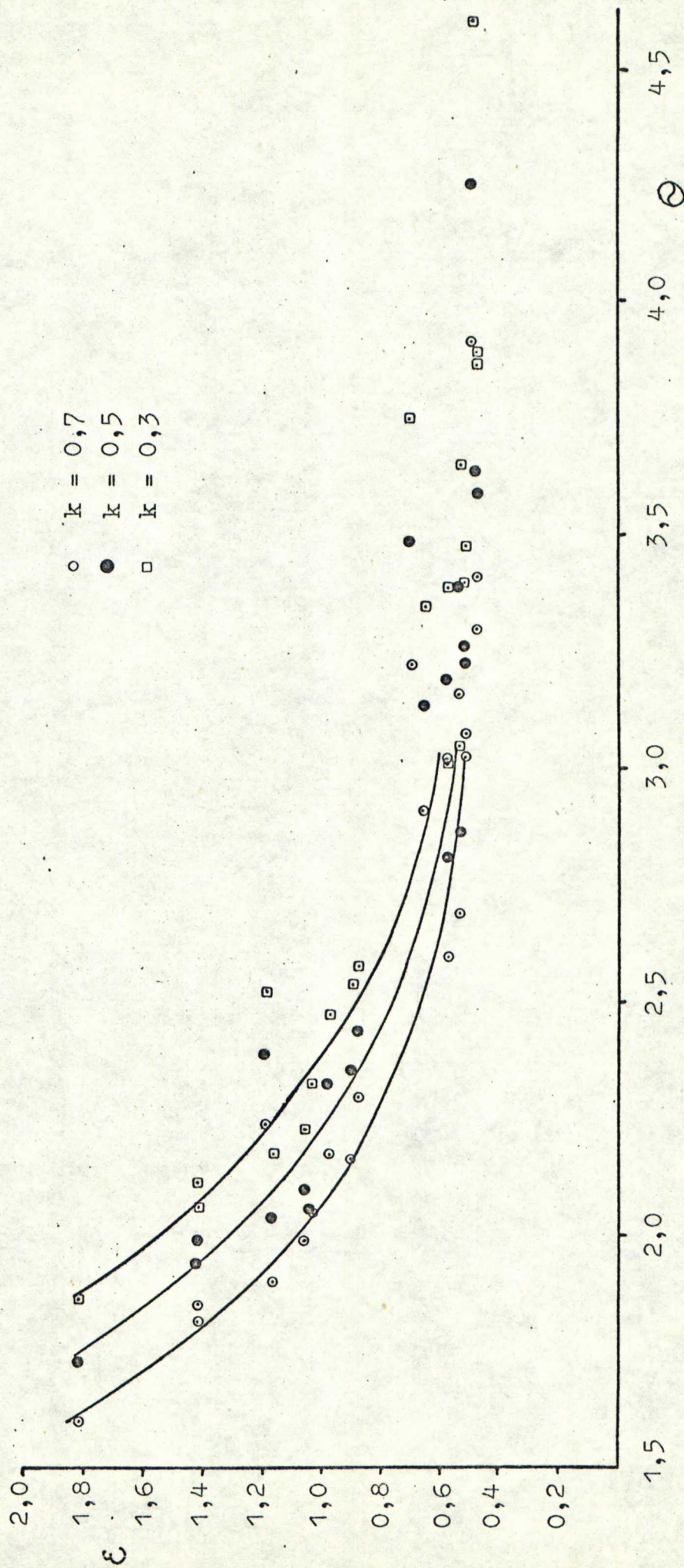
Dimensiottoman ajan ja epsilonin välistä riippuvuutta, kun parametrina on suhteellinen konsentraatio, esittää kuva [27] ja liite 6. Käytetyt suhteellisen konsentraation arvot ovat 0,7, 0,5 ja 0,3. Korrelaatiota on approksimoitu piirrettyillä käyrillä. Kuvasta havaitaan, että tiettyä epsilonin arvoa vastaa tiettyjen pisteiden kautta kulkeva käyrä dimensioton aika - suhteellinen konsentraatio - koordinaatistossa.

Jos em. koordinaatistossa määritellään käyrän jyrkkyys seuraavasti:

$$(35) \quad \lambda = \theta_{k=0,3} - \theta_{k=0,7}$$

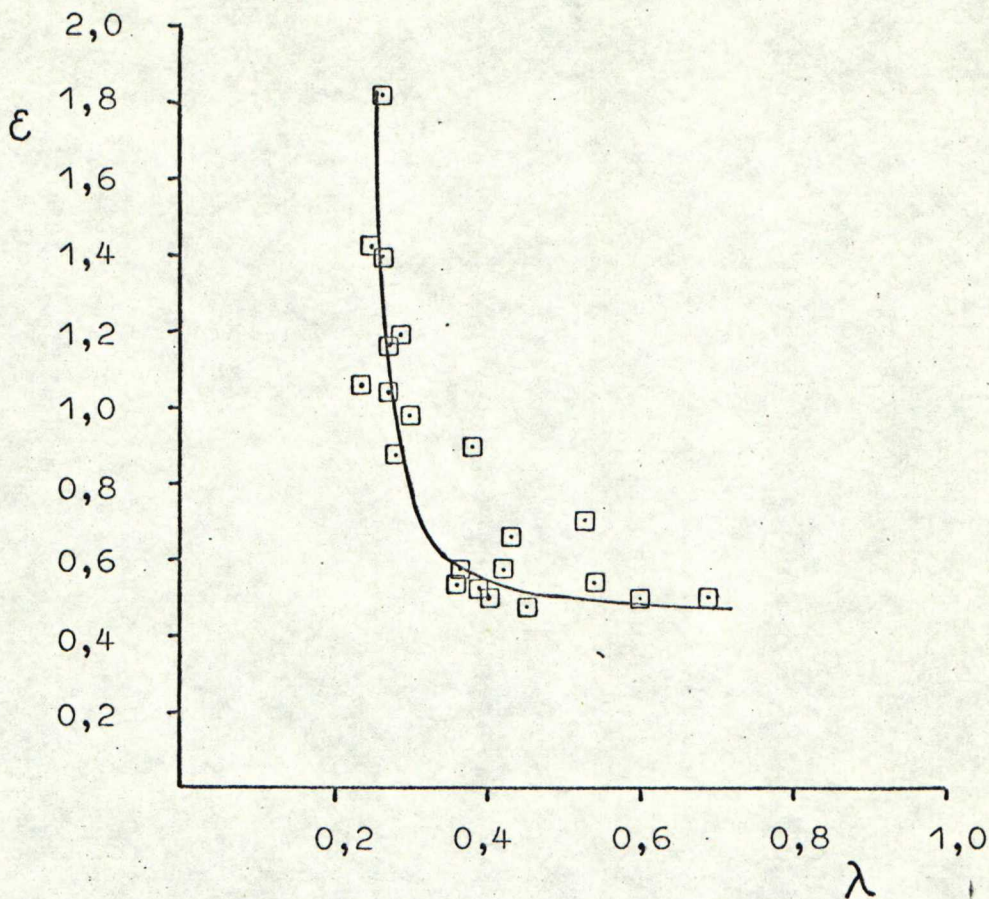
saadaan kuvassa [28] ja liitteessä 7 esitetty riippuvuus epsilonin ja jyrkkyyden välille. Verrattaessa kuvaan [28] piirretyn käyrän arvoihin kuvaan [27] piirretyistä käyristä saatuja jyrkkyyden arvoja havaitaan niiden olevan likimain samoja.





Kuva 27. Dimensiottoman ajan ja tilavuussuhteen välinen riippuvuus  
parametrina suhteellinen konsentraatio





Kuva 28. Tilavuussuhteen vaikutus pesun kuvaajan jyrkkyyteen  
k -  $\odot$  - koordinaatistossa

### 3. Johtopäätökset pesukokeiden tuloksista

Tuloksista voidaan havaita, että tiettyä painehäviötä vastaa tietty epsilonin arvo ja tietyssä paikassa dimensioton aika - suhteellinen konsentraatio - koordinaatistossa kulkeva käyrä, jonka jyrkkyys saadaan tulosten perusteella. Koska tiettyä painehäviötä, silloin



kun kakun yläpinta on vapaa, kuten käytetyssä laitteessa, vastaa tietty keskimääräinen konsistenssi, saadaan tällä perusteella ratkaistua  $V_1$  ja  $V_2$ . Näinollen saadaan myös määrättyä pesukäyrä aika - suhteellinen konsentraatio koordinaatistossa mikäli virtausnopeus tunnetaan.

#### 4. Virhelähteet pesukokeissa

Aikaisemmin mainitun porrasfunktion hyvyyden vaihtelun lisäksi vaikuttivat pesun tuloksiin lämpötilan vaihtelut ja vaihtelut kakun läpi menneessä virtausmäärässä.

Syöttösäiliötä täytettäessä ennen pesun aloitusta oli mahdotonta saada saman lämpöistä vettä jolla kyllästämisen oli suoritettu. Näin ollen konsentraationmuutoksen kanssa samanaikaisesti tapahtui myös muutos poistuvan veden lämpötilassa. Käytetyn pesuveden lämpötila oli pienempi kuin kyllästysliuoksen lämpötila, joten kakun läpi menevän liuoksen viskositeetti kasvoi, josta taas oli seurauksena tietyllä paineella pienempi virtausmäärä kakun läpi.

Virtausmäärän pienemiseen vaikutti myös kakun kokoonpuristuminen painettaessa kyllästysliuoksen pinta juuri kakun yläpinnan tasalle. Tällöin paine pääsi suo-



raan vaikuttamaan kakun pintakerrokseen, josta oli seurauksena kokoonpuristuminen. Koska painetta pidettiin muuttumattomana saavutettiin tällaisessa kokoonpuristuneessa kakussa pienempi virtausmäärä kuin se, jota käytettiin kakun vakioimisen aikana. Virtausmäärän vaihtelua aiheutti myös paineen vaihtelu pesun aikana.

## 5. Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin

Pesumekanismin tutkimiseksi on Ahonen tehnyt diplomityön /31/. Hänen suorittamissaan kokeissa painehäviö kakun yli oli nolla tai korkeintaan  $500 - 600 \text{ N/m}^2$  ( $5 - 6 \text{ cm H}_2\text{O}$ ) ja virtauskanavien tilavuus määritettiin käyttämällä kaikissa kokeissa samaa painetta  $9800 \text{ N/m}^2$  ( $0,1 \text{ kp/cm}^2$ ). Koska koeolosuhteet olivat näin erilaiset ei tässä työssä suoritettujen kokeiden ja Ahosen suorittamien kokeiden välillä kannata suorittaa vertailua.

### B. Painehäviökokeiden tulokset

#### 1. Painehäviön laskeminen

Mittauksen aikana saatuun manometrin lukemaan lisättiin paineenmuutosputken nestepinnan korkeus, jonka jälkeen



näin saadusta lukemasta vähennettiin mittaussysteemin hydrostaattinen paine, jonka suuruus oli 620 mmH<sub>2</sub>O ja viiralevyjen sekä vedenpoistosysteemin aiheuttama painehäviö, joka oli 200 - 350 mmH<sub>2</sub>O virtausmäärästä riippuen. Piirturi kalibroitiin manometrin avulla ja piirturilla havaitusta painehäviöstä suoritettiin myös vähennys, jolla huomioitiin viiralevyjen ja vedenpoistosysteemin aiheuttama painehäviö.

Suhteellinen painehäviö määrättiin seuraavasti:

$$(36) \quad \Delta p_{\text{suht}} = 1 - \frac{\Delta p_{\text{mit}}}{\Delta P}$$

$\Delta p_{\text{suht}}$  = suhteellinen painehäviö

$\Delta p_{\text{mit}}$  = mittauspisteestä havaittu painehäviö

$\Delta P$  = kokonaispainehäviö

Suhteellinen korkeus määritettiin seuraavasti:

$$(37) \quad h_{\text{suht}} = 1 - \frac{h}{H}$$

$h_{\text{suht}}$  = suhteellinen korkeus

$h$  = mittauspisteen etäisyys sellua tukevalta viiralevyltä

$H$  = kakun kokonaiskorkeus



Näin ollen kakun yläpinnalla on sekä suhteellinen painehäviö että suhteellinen korkeus nolla ja juuri kakua tukevan viiralevyn yläpuolella on sekä suhteellinen painehäviö että suhteellinen korkeus yksi.

## 2. Kokonaispainehäviön mittausten tulokset

Varsinaiset painehäviökokeet suoritettiin kahdella selluloosaerällä, jotka molemmat oli otettu hypoklooriittivalkaisun jälkeiseltä pesurilta. Osoittautui kuitenkin, että näiden kahden erän ominaisuuksissa oli selvä ero, joten niitä on käsitelty erikseen. Ensimmäisellä erällä suoritettujen kokeiden numerot ovat 50 - 59 ja toisen erän kokeiden numerot ovat 60 - 73. Suoritettujen kokeiden tulokset ja koeolosuhteet on esitetty liitteissä 10 - 12.

Kuvassa [29] on suoritettu vertailu ensimmäisen erän kokeiden ja Seppäsen /30/ ohjelmalla laskettujen kokonaispainehäviöiden välillä. Ohjelmalla laskettaessa käytettiin keskimääräiselle konsistenssille arvoa  $80 \text{ kg/m}^3$  ja viskositeetille arvoa  $0,000893 \text{ Ns/m}^2$ .

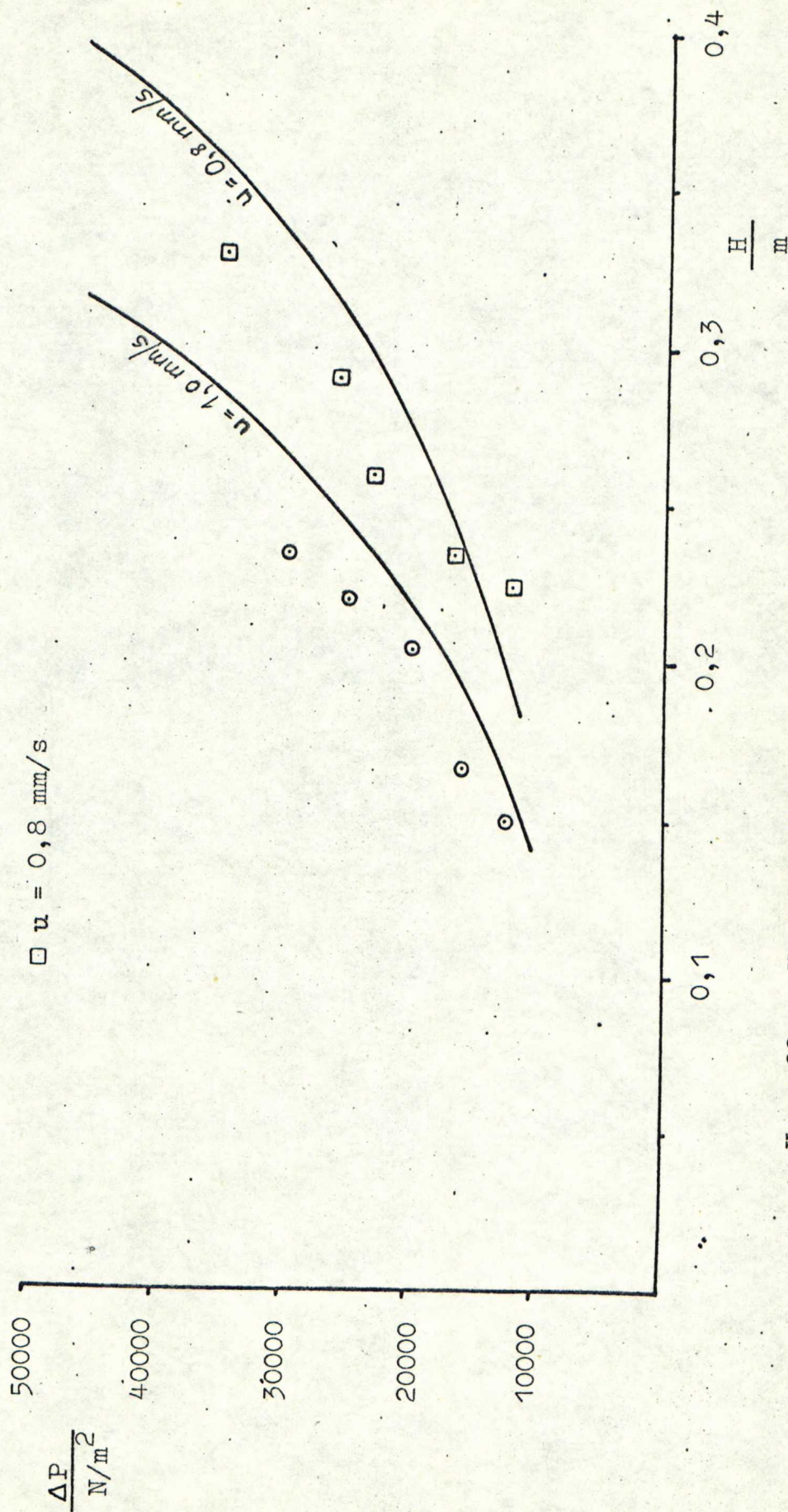
Kuvassa [30] on verrattu toisen erän kokeitten tuloksia Seppäsen tuloksiin, joita laskettaessa käytettiin kullakin virtausnopeudella havaittujen konsistenssien keskiarvoa. Gullichsen /32/ lähtee kokonaispainehäviön



Selluloosa I erästä

○  $u = 1,0 \text{ mm/s}$

□  $u = 0,8 \text{ mm/s}$

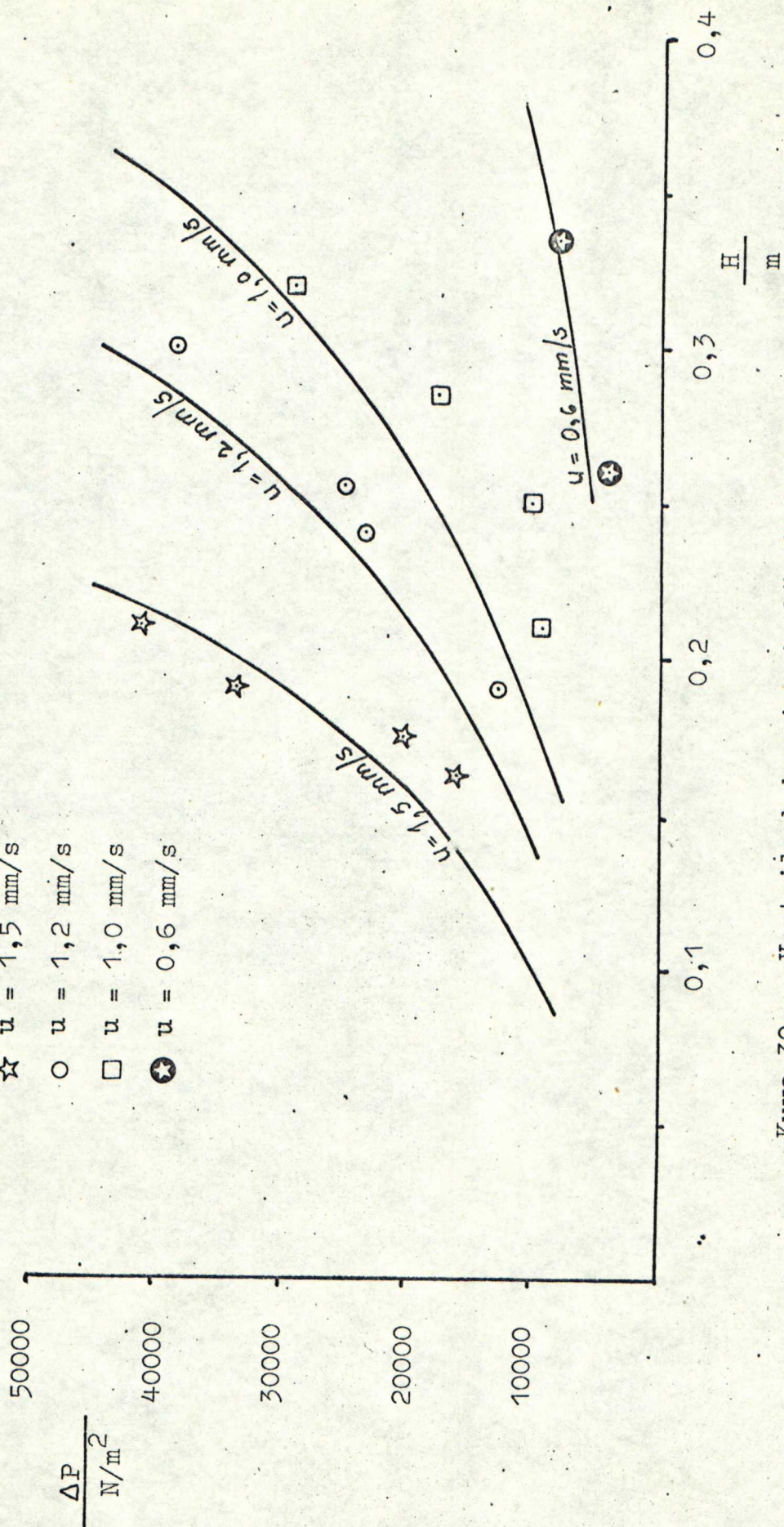


Kuva 29. Vertailu kokonaispainehäviökokeiden ja Seppäsen /30/ tulosten (käyrät) välillä



Selluloosa II erästä

- ☆  $u = 1,5 \text{ mm/s}$
- $u = 1,2 \text{ mm/s}$
- $u = 1,0 \text{ mm/s}$
- ⊗  $u = 0,6 \text{ mm/s}$



Kuva 30. Vertailu kokonaispainehäviökokeiden ja Seppäsen /30/ tulosten (käyrät) välillä



teoreettisessa määrityksessä liikkeelle samoista kaa-voista kuin Seppänen /30/. Ero on laskentamenetelmissä. Gullichsen suorittaa laskelmat nomogrammilla ja Seppänen tietokoneella. He ovat todenneet, että molemmilla menetelmillä päädytään likimain samoihin tuloksiin.

### 3. Painehäviön jakautuman mittausten tulokset

Kuvissa [31] , [32] ja [33] on vertailtu havaittuja painehäviön jakautumia Seppäsen ohjelmalla laskettuihin jakautumiin, jotka on esitetty kuvissa käyriä. Kuvassa [31] on esitetty ensimmäiselle selluloosaerälle saadut tulokset ja kuvissa [32] ja [33] toiselle selluloosaerälle saadut tulokset.

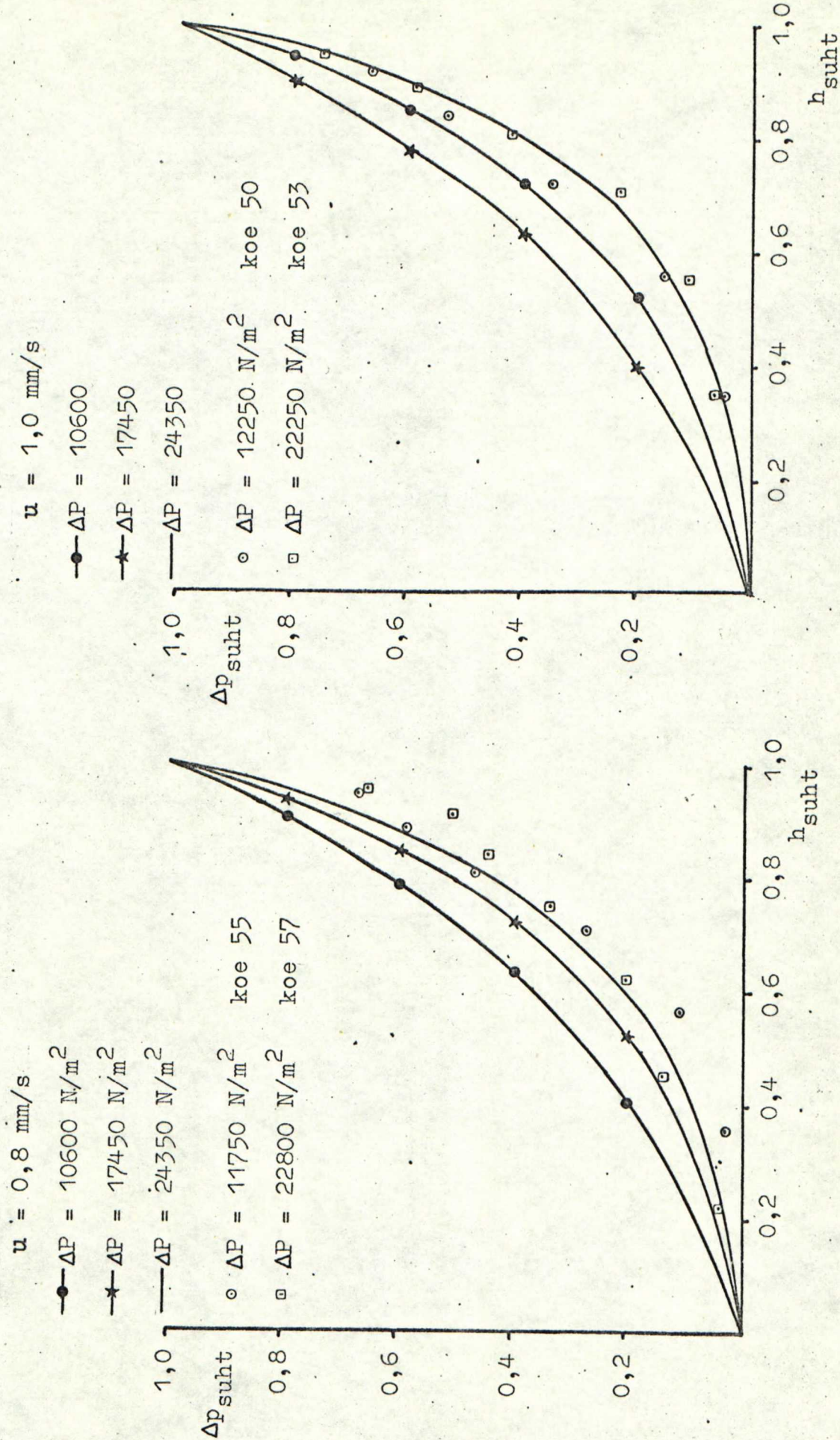
### 4. Johtopäätökset tuloksista

Kuvista [29] ja [30] voidaan havaita, että teoreettisilla laskelmilla saadaan suuruusluokaltaan samoja arvoja kuin kokeista. Suurimmat erot ovat suuruusluokaltaan n.  $5000 \text{ N/m}^2$  tutkitulla painealueella, joten teknillistä käyttöä varten on tarkkuus todennäköisesti riittävä.

Painejakautumakäyristä kuvissa [31] , [32] ja [33] voidaan havaita, että molemmilla selluloosaerillä



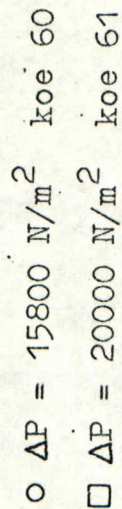
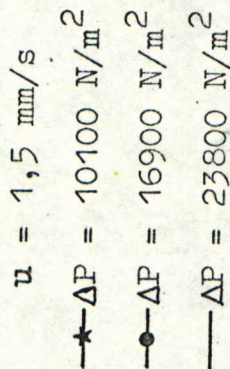
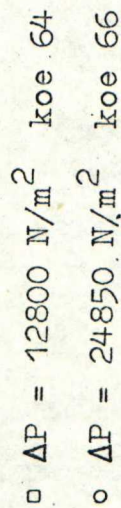
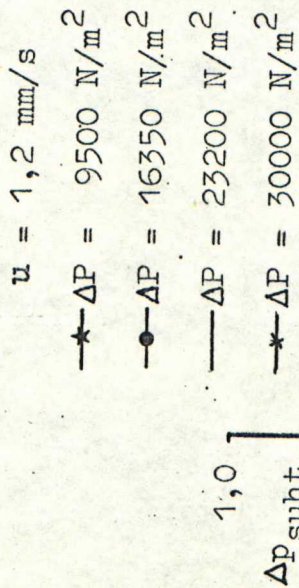
# Selluloosa I erästä



Kuva 31. Vertailu painehäviön jakautuman tulosten ja Seppäsen /30/ tulosten (käyrät) välillä



# Selluloosa II erästä



Kuva 32. Vertailu painehäviön jakautuman tulosten ja Seppäsen /30/ tulosten (käyrät) välillä



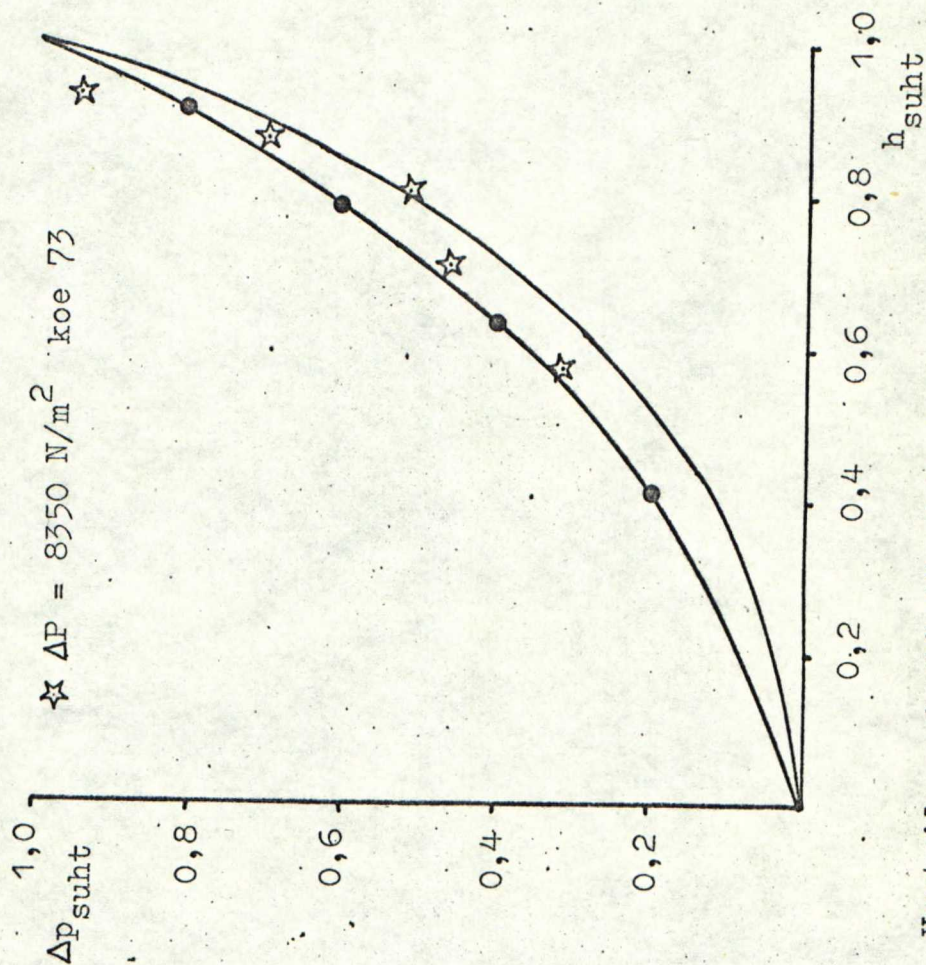
Selluloosa II erästä

$u = 0,6 \text{ mm/s}$

—●—  $\Delta P = 5680 \text{ N/m}^2$

—  $\Delta P = 9600 \text{ N/m}^2$

☆  $\Delta P = 8350 \text{ N/m}^2$  koe 73



Kuva 33. Vertailu painehäviön jakautuman tulosten

ja Seppäsen /30/ (käyrät) tulosten välillä



saavutetaan jyrkempi painehäviöprofiili kuin Seppäsen ohjelmalla laskettu painehäviöprofiili. Toisen erän tulokset poikkeavat kuitenkin teoreettisista tuloksista huomattavasti vähemmän kuin ensimmäisen erän tulokset.

Mikäli verrataan ensimmäisen ja toisen selluloosaerän tuloksia keskenään, voidaan havaita toisen erän selluloosan olevan huomattavasti jäykempää kuin ensimmäisen erän selluloosa. Tästä on seurauksena pienempi kokoonpuristuminen, jolloin tiettyä painehäviötä vastaa suurempi korkeus toisella erällä kuin ensimmäisellä erällä lineaarinopeuden ollessa vakio.

##### 5. Virhelähteet painehäviökokeissa

Suurimman epävarmuustekijän tuloksiin aiheuttaa se, että kakkua tukevan viiralevyn alapuolella ei ollut paineenmittauspistettä, vaan vertailupaineena käytettiin ilmanpainetta. Käytetyllä vedenpoistosysteemillä esitettiin kuitenkin imun syntyminen kakun alapuolelle.

Koska kakun yläpinta oli usein suhteellisen epätasainen, oli vaikeaa havaita tarkasti kakun korkeutta, mutta tässä tehty virhe oli suuruudeltaan korkeintaan  $\pm 1$  cm. Mahdolliset virheet korkeushavainnoissa ja virheet näytteenotossa määritettäessä kakun sisältämän



selluloosan määrää aiheuttavat helposti melko huomattavia virheitä keskimääräisen konsistenssin arvoihin. Lämpötilan vaihtelut aiheuttavat jonkin verran virheitä vertailtaessa teoreettisia ja kokeellisia tuloksia keskenään, mutta muihin virhelähteisiin verrattuna on lämpötilavirheiden merkitys suhteellisen pieni.

### C. Ehdotuksia tutkimusten jatkamiseksi

Samalla laitteistolla voitaisiin suorittaa pesukokeita erilaisilla selluloosalaaduilla ja tutkia näin miten selluloosan laatu vaikuttaa epsilonin riippuvuuteen kokonaispainehäviöstä. Samoin voitaisiin tutkia lämpötilan vaikutusta pesuun, mikäli pystyttäisiin saamaan kakku tasalämpimäksi. Voitaisiin myös vaihdella merkkiainetta ja tutkia mikä vaikutus tällä on pesun tulokseen.

Myös painehäviökokeita voitaisiin suorittaa eri selluloosalaaduilla ja vertailla miten teoreettiset arvot pitävät paikkansa eri laaduilla. Näiden vertailujen edellytyksenä on kuitenkin, että kullekin selluloosalaadulle määritetään  $M$ ,  $N$ , ominaispinta-ala ja ominaisvilavuus. Samoin voitaisiin tutkia väliaineen viskositeetin vaikutusta kokonaispainehäviöön muuttamalla joko lämpötilaa tai pesunestettä.



Tällä laitteistolla voitaisiin tutkia tällaisenaan  
erilaisten täytekappaleiden ja massakerrosten pesua  
ja painehäviötä.



## V YHTEENVETO

Työtä varten suunnitellulla laitteistolla tutkittiin selluloosakakkujen pesumekanismia ja painehäviötä.

Pesukokeissa kyllästettiin kakku ensin n. 1 paino% kaliumkloridiliuoksella, jonka jälkeen hetkellä  $t = 0$  muutettiin pesuliuoksen konsentraatiota kakun yläpinnalla porrasfunktion mukaisesti. Pesun edistymistä seurattiin määrittämällä kakusta poistuvan liuoksen sähkönjohtokyky ajan funktiona. Kokeissa määritettiin myös Järveläisen ja Nordénin matemaattiseen malliin tarvittavat kokeelliset parametrit.

Pesujen tuloksista havaitaan, että matemaattisella mallilla voidaan hyvin kuvata pesutapahtumaa, koska havaittiin, että tiettyä painehäviötä vastaa tietyssä paikassa kulkeva täysin määrätty pesun kuvaaja. Saatujen tulosten perusteella voidaan arvioida pesukäyrän sijainti aika - suhteellinen konsentraatio - koordinaatistossa kun tunnetaan kokonaispainehäviö kakun yli ja pesunesteen virtausnopeus.

Suoritetuista kokonaispainehäviökokeista voidaan havaita muutosten selluloosan ominaisuuksissa vaikuttavan suhteellisen voimakkaasti kokonaispainehäviön riip-



puvuuteen kakun korkeudesta virtausnopeuden ollessa parametrina. Suoritettujen kokeiden tuloksia on verrattu Seppäsen /30/ ja Gullichsenin /32/ teoreettisiin laskelmiin, joilla saadaan likimain samoja arvoja.

Koska kokeelliset ja teoreettiset arvot ovat suhteellisen lähellä toisiaan, voidaan tästä vetää se johtopäätös, että teoreettisilla laskelmilla saadaan teknillisesti käyttökelpoisia tuloksia. Suoritetuissa mittauksissa havaittiin jonkin verran jyrkempi painehäviöprofiili kuin Seppäsen ohjelmalla saatu painehäviöprofiili.



KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Forgacs, D.L., Robertson, A.A., Mason, S.G., The Hydrodynamic Behaviour of Papermaking Fibers, Pulp Paper Mag. Can. 59 (1958), № 5, 117 - 128
2. Lyne, L.M., Galley, W., Studies in the Fundamentals of Wet - Web Strength, Pulp Paper Mag. Can. 55 (1954), № 11, 128 - 134
3. Steenberg, B., Thalén, N., Wahren, D., Formation and Properties of Fibre Networks, Consolidation of the Paper Web (ed. Bolam, F.) vol. 1, London 1966, 180
4. Mason, S.G., The Motion of Fibres in Flowing Liquids, Pulp Paper Mag. Can. 51 (1950), № 5, 93 - 100
5. Meyer, R., Wahren, D., On the Elastic Properties of Three Dimensional Fibre Networks, Svensk Papperstid. 67 (1964), 474 - 480
6. Thalén, N., Wahren, D., An Experimental Investigation of the Shear Modulus of Model Fibre Networks, Svensk Papperstid. 67 (1964), 474 - 480
7. Elias, T.C., An Investigation of the Compression Response of Ideal Unbonded Fibrous Structures by Direct Observation, väitöskirja The Institute of



Paper Chemistry, Appleton, Vis., 1965, ref. Tappi  
50 (1967), 125 - 132

8. Han, S.T., Compressibility and Permeability of  
Fibre Mats, Pulp Paper Mag. Can. 70 (1969), № 9,  
65 - 77
9. Seborg, C.O., Simmonds, F.A., Baird, P.K., Proper-  
ties of Wet Fibre Mats: Relation of Recovery from  
Compressive Deformation to Sheet Properties, Paper  
Trade J. 109 (1939), № 8, 35 - 42
10. Seborg, C.O., Simmonds, F.A., Additional Data on  
the Recovery of Wet Pulp Mats from Compressive  
Deformation, Paper Ind. and Paper World 29 (1947)  
275 - 277
11. Seborg, C.O., Simmonds, F.A., Additional Data on  
the Recovery of Wet Pulp Mats from Compressive  
Deformation, Paper Trade J. 125 (1947), № 15,  
63 - 66
12. Qwiller, O., Utpresning av vann av cellulose,  
Papier-J. 26 (1938) 312 - 324
13. Campbell, W.B., The Physics of Water Removal, Pulp  
Paper Mag. Can. 48 (1947), Convention Issue,  
103 - 109
14. Ingmanson, W.L., An Investigation of the Mechanism



- of Water Removal from Pulp Slurries, Tappi 35  
(1952) 439 - 448
15. Jones, R.L., An Investigation of the Effect of  
Fibre Structural Properties on the Compression  
Response of Fibrous Beds, väitöskirja The Institute  
of Paper Chemistry, Appleton, Wis., 1962, ref.  
Tappi 46 (1963) 20 - 27
16. Ingmanson, W.L., Whitney, R.P., The Filtration  
Resistance of Pulp Slurries, Tappi 37 (1954)  
523 - 534
17. Van Wyk, C.M., J. Text. Inst. 37 (1946), T-285
18. Wilder, H.D., The Compression Creep Properties of  
Wet Pulp Mats, väitöskirja The Institute of Paper  
Chemistry, Appleton, Wis., 1959, ref. Tappi 43  
(1960) 715 - 720
19. Onogi, S., Sasaguri, K., The Elasticity of Paper  
and other Fibrous Sheets, Tappi 44 (1961)  
874 - 880
20. Kurath, S.F., The Network and Viscoelastic Proper-  
ties of Wet Pulps: I Dynamic Mechanical Properties,  
Tappi 42 (1959) 953 - 959
21. Attanasio, A., Bernini, U., Segré, G., Viscoelastic



- Behaviour of Dilute Fibre Suspensions, J. Colloid Interface Science 29 (1969) 81 - 90
22. Wahren, D., On Three Dimensional Fibre Networks, Svensk Papperstid. 67 (1964) 536 - 539
23. Thalén, N., Wahren, D., A New Elasto-Viscometer, Svensk Papperstid. 67 (1964) 226 - 231
24. Thalén, N., Wahren, D., Shear Modulus and Ultimate Shear Strength of Some Paper Pulp Fibre Networks, Svensk Papperstid. 67 (1964) 259 - 264
25. Wahren, D., On the Visco-Elastic Properties of Fibre Networks, Svensk Papperstid. 67 (1964) 259 - 264
26. Järveläinen, M.J., Nordén, H.V., Theoretical Study of Filter Cake Washing, BIT 8 (1968) 295 - 309
27. Ingmanson, W.L., Andrews, B.D., Johnson, R.C., Internal Pressure Distributions in Compressible Mats under Fluid Stress, Tappi 42 (1959) 840 - 849
28. Davies, C.N., Proc. Inst. Mech. Engrs. (London) 1B (1952) 185
29. Grén, U., Hedstöm, B., Fluid Flow and Pressure Drops in Thick Beds of Cellulose Fibres, Svensk Papperstid. 70 (1967) 339 - 346



30. Seppänen, R., suullinen tiedonanto
31. Ahonen, A.A., Selluloosan pesun mekanismin kokeel-  
lisesta määrittämisestä, diplomityö Teknillisen  
Korkeakoulun Kemian osasto, 1970
32. Gullichsen, J., suullinen tiedonanto



Liite 1

Virtausnopeuden vaikutus

koe 1 H=15,2 cm $\Delta P=36900 \text{ N/m}^2$ $\dot{V}=4,67 \text{ l/min}$	koe 4 H=14,5 cm $\Delta P=19500 \text{ N/m}^2$ $\dot{V}=4,59 \text{ l/min}$	koe 12 H=14,7 cm $\Delta P=16000 \text{ N/m}^2$ $\dot{V}=4,15 \text{ l/min}$	koe 20 H=15,0 cm $\Delta P=5600 \text{ N/m}^2$ $\dot{V}=3,22 \text{ l/min}$	koe 11 H=15,0 cm $\Delta P=3300 \text{ N/m}^2$ $\dot{V}=2,23 \text{ l/min}$
t/min k 0,96 1,000 1,88 0,942 2,06 0,870 2,16 0,796 2,38 0,576 2,50 0,431 2,62 0,285 2,81 0,139 3,00 0,065 3,56 0,010	t/min k 1,02 1,000 1,71 0,957 1,98 0,854 2,12 0,705 2,23 0,557 2,36 0,408 2,46 0,260 2,54 0,171 2,60 0,111 2,71 0,067 2,96 0,022	t/min k 1,25 1,000 2,08 0,970 2,14 0,940 2,29 0,877 2,40 0,785 2,58 0,555 2,72 0,400 2,83 0,246 2,92 0,169 3,06 0,092 3,39 0,031	t/min k 1,71 1,000 2,42 0,976 2,71 0,900 2,88 0,822 3,19 0,590 3,38 0,435 3,56 0,279 3,67 0,202 3,84 0,124 4,15 0,047 4,42 0,016	t/min k 3,56 1,000 4,13 0,978 4,35 0,950 4,68 0,850 5,02 0,730 5,48 0,530 5,75 0,396 6,03 0,262 6,23 0,196 6,54 0,138 7,15 0,076 7,50 0,049 8,12 0,023



# Virtausnopeuden vaikutus

koe 1	koe 4	koe 12	koe 20	koe 11
$\Theta$ k	$\Theta$ k	$\Theta$ k	$\Theta$ k	$\Theta$ k
0,68 1,000	0,96 1,000	1,04 1,000	1,46 1,000	2,20 1,000
1,12 0,971	1,52 0,957	1,49 0,985	2,06 0,976	2,56 0,978
1,33 0,942	1,63 0,927	1,78 0,940	2,31 0,900	2,69 0,950
1,45 0,870	1,77 0,854	1,91 0,877	2,46 0,822	2,89 0,850
1,59 0,723	1,89 0,705	2,00 0,785	2,56 0,745	3,10 0,730
1,68 0,576	1,99 0,557	2,15 0,555	2,72 0,590	3,39 0,530
1,77 0,431	2,10 0,408	2,26 0,400	2,88 0,435	3,55 0,396
1,85 0,285	2,20 0,260	2,36 0,246	3,04 0,279	3,73 0,262
1,92 0,212	2,26 0,171	2,43 0,169	3,13 0,202	3,85 0,196
1,99 0,139	2,32 0,111	2,54 0,092	3,28 0,124	4,04 0,138
2,06 0,095	2,42 0,067	2,82 0,031	3,54 0,047	4,42 0,076
2,25 0,036	2,64 0,022	2,92 0,015	3,77 0,016	4,63 0,049
2,52 0,007				5,02 0,023



Liite 3

Kakun korkeuden vaikutus

koe 18		koe 17		koe 14	
H=10,0 cm		H=19,5 cm		H=29,0 cm	
$\Delta P=3500 \text{ N/m}^2$		$\Delta P=12300 \text{ N/m}^2$		$\Delta P=46000 \text{ N/m}^2$	
$\dot{V}=3,09 \text{ l/min}$		$\dot{V}=2,98 \text{ l/min}$		$\dot{V}=2,98 \text{ l/min}$	
t/min	k	t/min	k	t/min	k
1,46	1,000	2,04	1,000	2,83	1,000
1,85	0,978	2,79	0,950	4,00	0,959
2,25	0,904	3,38	0,920	4,95	0,910
2,54	0,755	3,88	0,874	5,45	0,875
2,79	0,534	4,34	0,797	5,92	0,825
2,96	0,385	4,71	0,645	6,45	0,695
3,12	0,237	4,95	0,491	6,70	0,612
3,42	0,089	5,16	0,338	7,12	0,446
3,92	0,015	5,50	0,184	7,58	0,281
		5,74	0,107	7,80	0,198
		5,95	0,062	8,12	0,116
		6,45	0,031	8,87	0,033
				9,25	0,017



Liite 4

Kakun korkeuden vaikutus

koe 18		koe 17		koe 14	
Θ	k	Θ	k	Θ	k
2,20	1,000	1,36	1,000	0,96	1,000
2,80	0,978	1,86	0,950	1,35	0,959
3,40	0,904	2,24	0,920	1,67	0,910
3,66	0,830	2,58	0,874	2,00	0,825
3,84	0,755	2,88	0,797	2,08	0,777
4,21	0,534	3,13	0,645	2,26	0,612
4,47	0,385	3,29	0,491	2,40	0,446
4,70	0,237	3,43	0,338	2,56	0,281
4,87	0,163	3,66	0,184	2,64	0,198
5,16	0,089	3,80	0,107	2,75	0,116
5,35	0,045	3,96	0,062	3,00	0,033
5,92	0,015	4,30	0,031	3,13	0,017



Liite 5

Painehäviön vaikutus pesukäyrän sijaintiin  $\theta - k$   
koordinaatistossa parametrina  $k:n$  arvo 0,5

koe	$\frac{P}{N/m^2}$	$\theta$
1	36900	1,73
2	37900	1,94
3	20700	2,10
4	19500	2,04
5	20200	2,39
6	6700	2,86
7	5900	3,59
8	6500	3,22
9	6600	3,64
10	7850	3,13
11	3300	3,41
12	16000	2,19
13	34500	1,99
14	46000	2,35
15	44500	2,33
16	27500	2,44
17	12300	3,27
18	3500	4,24
19	10200	3,19
20	5600	2,81
21	2000	3,49



Liite 6

Dimensiottoman ajan ja tilavuussuhteen  
välinen riippuvuus parametrina  $k$ :n ar-  
vot 0,7, 0,5 ja 0,3

koe	$\varepsilon$	$\theta$ $k=0,7$	$\theta$ $k=0,5$	$\theta$ $k=0,3$
1	1,82	1,60	1,73	1,86
2	1,425	1,81	1,94	2,06
3	1,067	1,99	2,10	2,23
4	1,17	1,90	2,04	2,18
5	1,19	2,24	2,39	2,53
6	0,538	2,69	2,86	3,05
7	0,476	3,30	3,59	3,90
8	0,522	3,02	3,22	3,40
9	0,479	3,41	3,64	3,86
10	0,664	2,91	3,13	3,35
11	0,543	3,13	3,41	3,67
12	1,04	2,05	2,19	2,32
13	1,42	1,85	1,99	2,11
14	0,902	2,16	2,35	2,54
15	0,985	2,18	2,33	2,48
16	0,887	2,30	2,44	2,58
17	0,524	3,07	3,27	3,47
18	0,496	3,91	4,24	4,60
19	0,58	3,02	3,19	3,39
20	0,575	2,60	2,81	3,02
21	0,707	3,22	3,49	3,75



Liite 7

Tilavuussuhteen ja pesukäyrän jyrkkyyden  
välinen riippuvuus  $\theta$ - k - koordinaatis-  
tossa

koe	$\varepsilon$	$\lambda$
1	1,82	0,26
2	1,425	0,25
3	1,067	0,24
4	1,17	0,28
5	1,19	0,29
6	0,538	0,36
7	0,476	0,60
8	0,522	0,38
9	0,479	0,45
10	0,664	0,44
11	0,543	0,54
12	1,04	0,27
13	1,42	0,26
14	0,902	0,38
15	0,985	0,30
16	0,887	0,28
17	0,524	0,40
18	0,496	0,69
19	0,58	0,37
20	0,575	0,42
21	0,707	0,53



# Liite 8

## Pesukokeiden koeolosuhteet

koe	$\frac{H}{\text{cm}}$	$\frac{\dot{V}}{\text{l/min}}$	$\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{T}{^\circ\text{C}}$	$\frac{V_1}{\text{ml}}$	$\frac{V_2}{\text{ml}}$	$\epsilon$	$\frac{\theta/t}{\text{min}^{-1}}$	$\frac{\text{sellua}}{\text{g}}$	$\frac{c^0}{\text{kg/m}^3}$
1	15,2	4,67	36900	25	6500	3580	1,82	0,717	1030	95,8
2	25,0	3,46	37900	27	9510	6670	1,425	0,363	1665	94,2
3	19,0	3,74	20700	27	6510	6095	1,067	0,576	1228	91,5
4	14,5	4,59	19500	26	5150	4410	1,17	0,892	942	91,8
5	25,0	3,32	20200	23	8960	7500	1,19	0,371	1500	84,8
6	21,0	2,64	6700	26	4950	10325	0,538	0,493	1175	79,3
7	12,5	4,15	5900	26	2700	5670	0,476	1,535	680	77,0
8	17,0	3,23	6500	28	3940	7555	0,522	0,814	923	76,8
9	16,5	3,40	6600	25	3500	7320	0,479	0,967	903	77,3
10	17,0	2,71	7850	26	4400	6630	0,664	0,676	910	75,8
11	15,0	2,23	3300	24	3600	6630	0,543	0,619	790	74,7
12	14,7	4,15	16000	24	4970	4800	1,04	0,833	917	88,3



# Liite 9

## Pesukokeiden koeolosuhteet

koe	$\frac{H}{\text{cm}}$	$\frac{\dot{V}}{\text{l/min}}$	$\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{T}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{V_1}{\text{ml}}$	$\frac{V_2}{\text{ml}}$	$\varepsilon$	$\frac{\theta/t}{\text{min}^{-1}}$	$\frac{\text{sellua}}{\text{g}}$	$\frac{c^0}{\text{kg/m}^3}$
13	15,3	4,78	34500	25	5850	4110	1,42	0,818	1010	93,2
14	29,0	2,98	46000	24	8800	9790	0,902	0,342	1990	97,3
15	30,0	2,85	44500	25	9700	9830	0,985	0,302	1990	94,0
16	24,0	3,16	27500	24	7320	8250	0,887	0,420	1655	97,5
17	19,5	2,98	12300	21	4490	8570	0,524	0,665	1205	87,3
18	10,0	3,09	3500	24	2050	4130	0,496	1,51	506	71,7
19	16,5	3,50	10200	24	3900	6720	0,580	0,896	985	84,4
20	15,0	3,22	5600	24	3775	6525	0,575	0,855	796	75,2
21	10,5	2,83	2000	25	2600	3670	0,707	1,09	432	58,2



Liite 10

Painekekoideiden koeolosuhteet ja tulokset

koe	$\frac{u}{\text{mm/s}}$	$\frac{H}{\text{cm}}$	$\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{T}{^\circ\text{C}}$	$\frac{\text{sellua}}{\text{g}}$	$\frac{c^0}{\text{kg/m}^3}$	$\Delta p_{\text{suht}}$ $h_{\text{suht}}$						
50	1,0	15,0	12250	27	815	77,0	0,657 0,920	0,533 0,840	0,352 0,720	0,148 0,567	0,060 0,347		
51	1,0	16,5	15800	27	912	78,4							
52	1,0	20,5	19400	26	996	68,7							
53	1,0	22,0	22250	25	1370	88,0	0,752 0,945	0,587 0,891	0,423 0,809	0,226 0,705	0,111 0,555	0,061 0,350	
54	1,0	23,5	28300	25	1525	91,7							
55	0,8	22,5	11750	28	1182	74,4	0,774 0,947	0,595 0,893	0,462 0,813	0,274 0,711	0,110 0,564	0,031 0,364	
56	0,8	23,5	16100	26	1405	84,5							
57	0,8	26,0	22800	26	1530	83,4	0,660 0,954	0,510 0,908	0,453 0,838	0,336 0,750	0,204 0,623	0,138 0,450	0,040 0,219
58	0,8	29,0	25500	25	1580	77,3							
59	0,8	33,0	34400	28	1820	78,2							



Liite 11

Painemittauskokeiden koeolosuhteet ja tulokset

koe	$\frac{u}{\text{mm/s}}$	$\frac{H}{\text{cm}}$	$\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{T}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\text{sellua}}{\text{g}}$	$\frac{c^{\circ}}{\text{kg/m}^3}$	$\frac{\Delta p_{\text{suht}}}{h_{\text{suht}}}$				
60	1,5	16,2	15800	23	905	78,9	0,719 0,925	0,603 0,850	0,376 0,738	0,199 0,594	0,080 0,424
61	1,5	17,5	20000	23	880	71,3	0,678 0,931	0,442 0,863	0,314 0,760		
62	1,5	19,0	33200	25	1145	85,4					
63	1,5	21,0	40800	26	1225	82,6					
64	1,2	19,0	12800	24	962	71,7	0,846 0,936	0,621 0,874	0,465 0,779	0,316 0,658	0,178 0,484
65	1,2	24,0	23350	23	1175	69,3					
66	1,2	25,5	24850	24	1240	69,0	0,678 0,954	0,502 0,906	0,347 0,835	0,235 0,745	0,109 0,615
67	1,2	30,0	38200	24	1590	75,0					0,055 0,439
68	1,0	21,0	9400	25	1042	67,9					
69	1,0	25,0	10100	27	1308	73,9					



Liite 12

Painemittauskokeiden koeolosuhteet ja tulokset

koe	$\frac{u}{\text{mm/s}}$	$\frac{H}{\text{cm}}$	$\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{T}{^\circ\text{C}}$	$\frac{\text{sellua}}{\text{g}}$	$\frac{c^\circ}{\text{kg/m}^3}$	$\frac{\Delta p_{\text{suht}}}{h_{\text{suht}}}$	
70	1,0	28,5	17450	26	1333	66,2		
71	1,0	32,0	29100	26	1655	73,2		
72	0,6	26,0	4400	24	1089	59,2		
73	0,6	33,5	8350	25	1505	63,6	0,951 0,704 0,518 0,464 0,928 0,875 0,806 0,707	0,321 0,573



Liite 13

Seppäsen ohjelmalla /30/ saadut tulokset

$u=1,0 \text{ mm/s}$ $c^0=80,0 \text{ kg/m}^3$ $\eta=0,893 \text{ cP}$	$u=0,8 \text{ mm/s}$ $c^0=80,0 \text{ kg/m}^3$ $\eta=0,893 \text{ cP}$	$u=1,5 \text{ mm/s}$ $c^0=76,4 \text{ kg/m}^3$ $\eta=0,893 \text{ cP}$	$u=1,2 \text{ mm/s}$ $c^0=71,25 \text{ kg/m}^3$ $\eta=0,893 \text{ cP}$	$u=1,0 \text{ mm/s}$ $c^0=70,3 \text{ kg/m}^3$ $\eta=0,893 \text{ cP}$	$u=0,6 \text{ mm/s}$ $c^0=62,0 \text{ kg/m}^3$ $\eta=0,893 \text{ cP}$
$\frac{H}{\text{cm}}$ $\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{H}{\text{cm}}$ $\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{H}{\text{cm}}$ $\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{H}{\text{cm}}$ $\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{H}{\text{cm}}$ $\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$	$\frac{H}{\text{cm}}$ $\frac{\Delta P}{\text{N/m}^2}$
14,0	17,4	9,9	13,8	16,5	23,4
20,6	25,8	14,4	19,5	23,8	34,5
24,7	30,9	17,2	23,3	28,2	41,8
27,6	34,5	19,3	25,8	31,5	45,2
29,9	37,4	21,0	28,0	34,1	50,0
31,8	39,7	22,3	30,0	36,4	50,0
10600	10600	10100	9500	9400	5680
17450	17450	16900	16350	16300	9600
24350	24350	23800	23200	23100	13500
31200	31200	30700	30000	30000	17450
38000	38000	37500	36900	36800	21350
44900	44900	44400	43700	43700	21350



